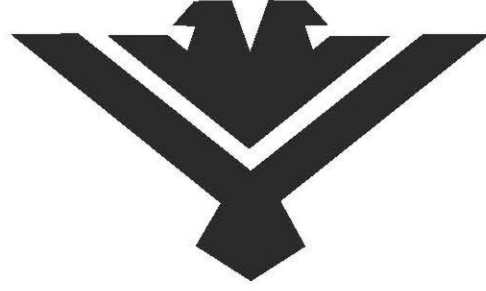




Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2023 - Cilt : 11 - Sayı : 2
2023 - Volume : 11 - Issue : 2

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

HAKEMLİ DERGİDİR

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. 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. İhsan ÖZKAN

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM

Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN

Assist. Prof. Dr. Kemal ERDOĞAN

Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN

Assist. Prof. Dr. Sercan BÜLBÜL

Assist. Prof. Dr. Muhammed Arif ERGÜN

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof.Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University

Prof.Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University

Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University

Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University

Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University

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

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

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

Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University

Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University

Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Assist. Prof. Dr. İsmail 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 Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Devenci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

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

ISSN 2667 – 8055 (Elektronik/Electronic)

Cilt	11	Mart	2023	Sayı	2
Volume	11	March	2023	Issue	2

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

EXTRACTION OF PHENOLIC COMPOUNDS FROM FENUGREEK SEEDS: MODELLING AND ANALYSIS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Selami BEYHAN, Hilal İŞLEROĞLU 312-323

ÇİHANBEYLİ-CELİL BOĞAZI (KONYA) PERİ BACALARININ ARAŞTIRILMASI VE FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Investigation of Fairy Chimneys of Cihanbeyli-Celil Strait (Konya) and Determination of Physico-Mechanical Properties

Niyazi BİLİM, Bilgehan KEKEÇ, Emre KARAKAYA, Özer KARAKAYACI 324-340

SENTIMENT CLASSIFICATION ON TURKISH TWEETS ABOUT COVID-19 USING LSTM NETWORK

Mustafa ÇATALTAŞ, Büşra ÜSTÜNEL, Nurdan AKHAN BAYKAN 341-353

COVID-19 DETECTION USING VARIATIONAL MODE DECOMPOSITION OF COUGH SOUNDS

Fatma Zehra SOLAK 354-369

FARKLI ÇÖZÜCÜ ORTAMLARINDA TUNGSTOFOSFORİK ASİT KATALİZÖRLÜĞÜNDE KİTOSANDAN LEVULİNİK ASİT ÜRETİMİ

Production of Levulinic Acid from Chitosan in Different Solvent Mediums Using Tungstophosphoric Acid as Catalyst

Şeyma ÖZDEMİR, Berna NİŞ, Burçak KAYA ÖZSEL 370-378

Ni₂ZnAl ALAŞIMININ İLK PRENSİPLER YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Examination of The Ni₂ZnAl Alloy by First Principles Method

Tahsin ÖZER 379-390

PANDEMİ SÜRECİNDE HEMŞİRE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ

Goal Programming Model for Nurse Schedule Problem in the Pandemic Process

Müberra KOÇAK, Gizem EKREN, Rabia YUMUŞAK, Tamer EREN, Hacı Mehmet ALAKAŞ ...

..... 391-407

YÜKSEK MERTEBE KAYMA DEFORMASYON TEORİSİNE DAYALI POROZ ORTOTROPİK TABAKALI PLAKLARIN BURKULMA ANALİZİ Buckling Analysis of Porous Orthotropic Laminated Plates Within Higher-Order Shear Deformation Theory Ferruh TURAN, Suna ULU, Yıldız ÜNAL	408-422
DEEP LEARNING BASED HUMAN ROBOT INTERACTION WITH 5G COMMUNICATION Mücahid BARSTUĞAN, Zeynep OSMANPAŞAOĞLU	423-438
INVESTIGATION OF PHYSICOCHEMICAL AND THERMAL PROPERTIES OF CLAY-HYDROGEL COMPOSITES Firdevs ÇİRLİ, Gülcihan GÜZEL KAYA, Hüseyin DEVECİ	439-448
Bin_MRFOA: A NOVEL MANTA RAY FORAGING OPTIMIZATION ALGORITHM FOR BINARY OPTIMIZATION Gülner YILDIZDAN	449-467
ÇEVRESEL SESLERİN EVRİŞİMSEL SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI Classification of Environmental Sounds with Convolutional Neural Networks Yalçın DİNÇER, Özkan İNİK	468-490
KONVEKTİF VE MODİFİYE EDİLEN SICAKLIK KONTROLLÜ BİR MİKRODALGA FIRINDA KURUTULAN İHLAMURUN BAZI FİZİKO-KİMYASAL ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI Investigation of Some Physio-Chemical Properties of Lime Dry in a Convective and Modified Temperature Controlled Microwave Oven Muhammed TAŞOVA, Hakan POLATCI	491-503
KINEMATIC ANALYSIS OF CONSTANT BREADTH CAM DRIVEN LINKAGES Mert Eren AYĞAHOĞLU, Ziya ŞAKA	504-517
ATIK ÇİNKO CÜRUF TOZU KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN TAZE BETON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ Investigation of Fresh Concrete and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Waste Zinc Slag Admixture Türky KOTAN, Metehan ARDAHANLI, Ömer Furkan ÖZBEY	518-529
WETTABILITY IMPROVEMENT OF PMMA FILMS WITH HIGH FREQUENCY RF PLASMAS Zahide TOSUN, Ayhan ÖZMEN	530-542
SÜPER KRİTİK CO₂'nin P3HT/PCBM ve PVP-AgNP MALZEMELERDE NANOPARTİKÜL DAĞILIMININ KONTROLÜ Frekans Control of Nanoparticle Distribution of Super Critical CO ₂ in P3HT/PCBM and PVP-AgNP Materials Fatma Zehra YALÇIN, Selda TOPÇU ŞENDOĞDULAR, Levent ŞENDOĞDULAR	543-556
IMPROVEMENT OF WOLF LEADER IN THE GREY WOLF OPTIMIZATION Onur INAN, Mustafa Serter UZER	557-570

Derleme Makalesi (Review Article)

**ENGINEERING REQUIRED TO HAVE SAFE STRUCTURES IN/ON THE EARTH CRUST
AND EUROCODE 7**

Mehmet Kemal GÖKAY 571-580

**COMPUTER VISION IN PRECISION AGRICULTURE FOR WEED CONTROL: A SYSTEMATIC
LITERATURE REVIEW**

Damla KARAGOZLU, John Karima MACHARIA, Tolgay KARANFILLER 581-600

EXTRACTION OF PHENOLIC COMPOUNDS FROM FENUGREEK SEEDS: MODELLING AND ANALYSIS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

^{1*}Selami BEYHAN , ²Hilal İŞLEROĞLU 

¹ Izmir Democracy University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, İzmir, TÜRKİYE

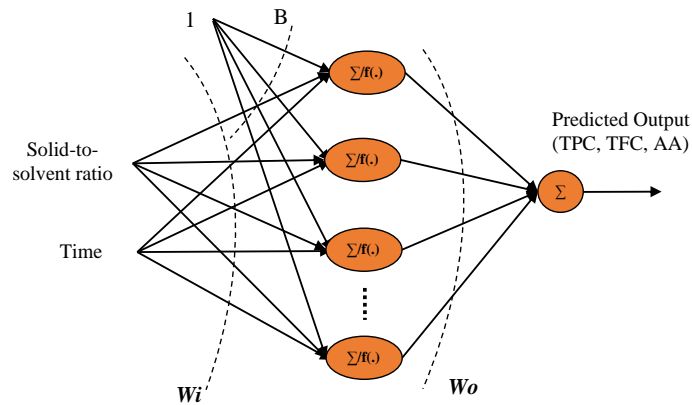
² Tokat Gaziosmanpasa University, Engineering and Architecture Faculty, Food Engineering Department, Tokat, TÜRKİYE

¹selami.beyhan@idu.edu.tr, ²hilal.isleroglu@gop.edu.tr

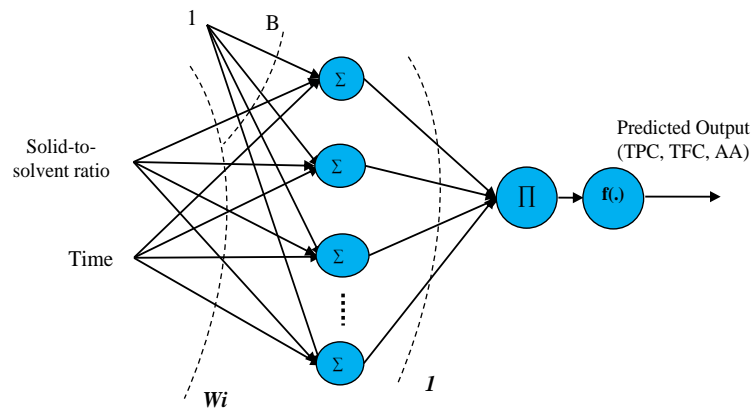
Highlights

- Modeling and analysis of the extraction process of bioactive compounds for fenugreek seeds.
- Experiments to collect the data of total phenolic compounds, total flavonoid content and antioxidant activity.
- High modelling performances with conventional artificial neural-networks and Pi-Sigma neural-networks.

Graphical Abstract



Modeling of bioactive compounds using conventional ANN model



Modeling of bioactive compounds using PSNN model



EXTRACTION OF PHENOLIC COMPOUNDS FROM FENUGREEK SEEDS: MODELLING AND ANALYSIS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

^{1*}Selami BEYHAN , ²Hilal İŞLEROĞLU 

¹ Izmir Democracy University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, İzmir, TÜRKİYE

² Tokat Gaziosmanpasa University, Engineering and Architecture Faculty, Food Engineering Department, Tokat, TÜRKİYE

¹selami.beyhan@idu.edu.tr, ²hilal.isleroglu@gop.edu.tr

(Received: 22.11.2022; Accepted in Revised Form: 12.01.2023)

ABSTRACT: This study introduces the modeling and analysis of the extraction process of bioactive compounds from fenugreek seeds in different solid-to-solvent ratios (0.5-60 g/L) and extraction times. Maceration was applied with agitation for the extraction processes and total phenolic compounds, total flavonoid content and antioxidant activity of the extracts were measured as experimental data. The amount of extractable phenolic compounds having antioxidant effect was increased by adjusting the solid-to-solvent ratio. According to obtained results, the highest values were determined as 12564.08±376.88 mg gallic acid/100 g dry sample, 7540.44±39.67 mg quercetin/100 g dry sample and 1904.80±17.43 mM Trolox/100 g dry sample for total phenolic compounds, total flavonoid content, and antioxidant activity, respectively. The extraction process was modeled using standard Artificial Neural Networks (ANN) and Pi-Sigma Neural-Networks (PSNN). The PSNN model had a higher prediction efficiency with lower RMSE (%) values varied between 0.94% and 1.30% for both training and testing.

Keywords: Fenugreek Seed, Phenolic Compounds, Antioxidant Activity, Modelling, Artificial Neural Network

1. INTRODUCTION

Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) is a legume of the *Leguminosae* family that grows in the Mediterranean region, and its seeds are the most valuable plant part. Fenugreek seeds were used as medicine in ancient times, and today it is generally used as a spice with its unique flavor [1-2]. In addition to being preferred to give taste and flavor to curries, the seeds are used in the food industry to enhance flavor, prevent bacterial contamination, and extend shelf life. Fenugreek seeds are also added to many food products such as bakery and meat products, alcoholic beverages, candies, syrups, and sugary sauces, chewing gums, and sugar creams [3]. Also, fenugreek has been widely used as an important dietary supplement in several countries and most supplements are made from fenugreek seeds or seed extracts [2].

Fenugreek seed is a product with a very rich composition in terms of phenolic substances, dietary fiber, protein, oil, nitrogenous compounds, various minerals, and vitamins. Due to its rich composition, fenugreek seed is known to have important and positive effects on human health [4-5]. It is known that fenugreek seeds have antioxidant and antimicrobial properties, anti-inflammatory, hypoglycemic, antipyretic, hypolipidemic, anticholesterolemic, anthelmintic, antileprotic and antibronchitic effects [3, 6-7]. These effects of fenugreek seeds have been associated with flavonoids such as vitexin, tricine, narinjenin, quercetin, luteolin and molecules with antioxidant effects such as ascorbic acid, glutathione, β -carotene, alpha tocopherol in their extracts [8-10]. Therefore, the extraction of phenolic compounds having antioxidant activity from fenugreek seeds can potentially increase the economic value of this plant and create new usage areas for the product.

*Corresponding Author: Selami BEYHAN, selami.beyhan@idu.edu.tr

Artificial neural networks (ANNs) are one of the well-known learning models that holds an important place in artificial intelligence and have been recently used in many applications of food processes [11]. So far, single-layered ANN models are used in many fields of science due to design and implementation advantages. The hidden layer and output layers of these ANN models are usually in the same standard form. Therefore, a numerous number of ANN synthesis studies can be found using this standard form in literature. However, single-layer ANN models are not uniform either. High-order neural networks (HONN) are also single-layered ANN models [12], and have likewise fast learning capacity, strong approximation, large storage capacity, high fault tolerance, and accurate mapping capability. On the other hand, multi-layered neural networks have disadvantages due to the large number of parameters, time-consuming training process for the complex and nonlinear processes [13]. The fundamental difference of conventional ANN and HONN models is based on the output construction that can be constructed with multiplicative and additive neuron models [14]. Pi-Sigma Neural-Networks (PSNN) are a class of HONN with a high-approximation capability that were introduced in [12]. PSNN is much more successful in prediction of time series or time-series-like data compared to conventional one hidden-layered ANN and other HONN models [13-15] and has fast convergence speed compared to the multi-layer perceptron networks [16]. Recently, convergence analysis of a new sigma-pi-sigma neural-network convergence analysis has been presented in [17]. In food processes, there are time series-like behaviors under unknown inputs of the environment and PSNN model has been known to be very successful in estimating time series.

In literature, ANN based modelling has been recently applied for simulation and optimization for the extractions of phenolic compounds from garlic [18], green and black tea [19], cocoa shell [20], sweet potato peel [21], peppermint [22], grape skin pomaces [23], and to predict the particle size of phenolic compounds in nano-systems [24]. However, there have been no studies modeling and analyzing the extraction of phenolic compounds from fenugreek seeds by ANN. Furthermore, with the best knowledge of authors, PSNN model has not been used in food processes of literature. Due to the importance of bioactive components, extraction must be achieved efficiently, so this study is conducted to analyze and optimize the extraction process. The aims of the present study are to propound the contents of phenolic compounds and antioxidant activity of fenugreek seeds, and to model the extraction process and simulate the effects of solid-to-solvent ratio on extraction efficiency.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Material

Fenugreek seeds were purchased from a local market in Turkey. After removing the impurities, the seeds were granulated using a grinder (Sinbo SHB 3020, Turkey). The particles were sieved using a pore diameter of 630 μm sieve and the powder taken under the sieve was used in extraction processes. All chemicals (Folin-Ciocalteu reagent, sodium carbonate (Na_2CO_3), sodium nitrite (NaNO_2), aluminum chloride (AlCl_3), sodium acetate (CH_3COONa), 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), gallic acid, Trolox, quercetin) used were of analytical better/grade.

2.2. Extraction processes

Extraction of polyphenols from fenugreek seeds were carried out using classical extraction only with distilled water as a solvent. A magnetic stirrer was used at 400 rpm for agitation of the fenugreek powder and distilled water. The effect of extraction time and solid-to-solvent ratio on total phenolic compounds (TPC), total flavonoid content (TFC) and antioxidant activity (AA) of the extracts were investigated. Accordingly, 30-360 minutes of extraction times and solid-to-solvent ratio of 0.5-60 g/L were chosen as the extraction parameters. All the extraction processes were performed at 25°C. After extraction processes,

samples were centrifuged at 6000 rpm for five minutes, and supernatants were used for the analysis. All the experiments were duplicated.

2.3. Total phenolic compounds (TPC)

Folin-Ciocalteu method was used for determination of TPC present in fenugreek seed extracts [37]. The extract was mixed with diluted Folin-Ciocalteu at a ratio of 1:1 (v/v). A solution of Na_2CO_3 (210 g/L) was added to this mixture. The mixture was incubated at room temperature for 25 minutes and then the samples were centrifuged at 3800 rpm for 10 minutes. The absorbances of the supernatants were measured at 760 nm (PG Instruments T80, UK). TPC was presented as mg gallic acid/100 g dry sample.

2.4. Total flavonoid content (TFC)

TFC of the fenugreek seed extracts was determined by aluminum chloride method [6]. The extract diluted with distilled water was mixed with NaNO_2 and incubated for 5 minutes. Then 10% AlCl_3 was added, and incubation was continued for 6 minutes more. At the end of the incubation, 1 M NaOH solution was added and the absorbances of the samples were read at 510 nm wavelength. Total flavonoid compounds are expressed as mg quercetin/100 g dry sample.

2.5. Antioxidant activity (AA)

AA of the samples were measured with DPPH radical scavenging activity method [25]. 50 μL of sample was mixed with 0.1 mM (prepared in ethanol) of 1.95 ml DPPH. After incubation for 30 minutes, the absorbance of the samples was determined at 515 nm wavelength. The AA of the samples was explicated as mM Trolox/100 g dry sample.

2.6. Predictive modeling using artificial neural-networks

The extraction process is mathematically assumed as nonlinear, discrete-time, casual, two-input and single-output static mapping function which is modeled by artificial neural-network as:

$$\hat{y}_k = ANN(t_k, C_k, \hat{W}) \quad (1)$$

where $\hat{y}(k)$ is the predicted output variable, ANN is the optimized artificial neural-network model, k is the experiment number or sample index, t_k is the time (duration of extraction process), C_k is the solid-to-solvent ratio and \hat{W} is the optimized parameters of the network. Designed model provides the predictions of there outputs such as TPC, TFC and AA at the same time. By doing that any of the input time and solid-to-solvent ratio input values the output predictions can be obtained by the designed artificial neural-networks. Figure 1 illustrates a one hidden layer standard ANN structure where its functional form is formulated as:

$$\hat{y} = W_o^T f(W_i x + B) \quad (2)$$

where \hat{y} is the predicted output and x is the input values of the model. The W_i and W_o are input-layer and output-layer weighting parameters, respectively. The B vector is the bias parameter vector for hidden-layer neuron to prevent their sleepness. In equation (2), total parameter matrix can be rewritten as $\hat{W} = [W_o \ W_i \ B]$ to be optimized for the construction of optimal model for input-output approximation. The $f(\cdot)$ is the activation function of the neuron cells. Conventional logistic function is

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3)$$

here used as an activation function of the neurons [12, 15].

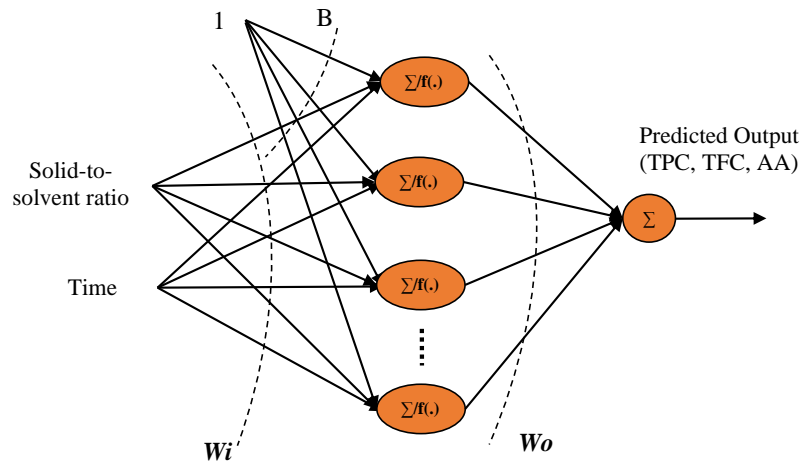


Figure 1. Standard ANN model.

2.7. Pi-Sigma Neural-Network (PSNN)

PSNN model was first introduced in Shin and Ghosh [12] where the multiplication of the linear combinations of the network inputs construct the output of the network. The linear combination of the network inputs shows the degree of the PSNN. When the problem definition is highly nonlinear and complex, in order to model the input-output behavior, there is need a relatively large degree. The large degree of PSNN provides better prediction results, but needs more computational time of training due to the overfitting. For standard regression data, small number of the linear combination might be enough for the output modeling. The PSNN model with n inputs and m outputs are illustrated in Figure 2. The linear combination of the inputs are calculated by tunable W_i parameter and biases parameter vector B is added to calculate the outputs of the hidden neuron cells. The j^{th} neuron output of the hidden-layer is calculated as

$$h_k = f_h(\sum_{i=1}^n W_{ik}x_i + B_k) \quad k = 1 \dots H \quad (4)$$

where, f hidden activation function is selected as a linear activation function as $f_h(x) = x$. However, the outputs are calculated using logistic activation function $f(x) = \frac{1}{1+\exp(-x)}$ as

$$\hat{y}_r = f(\prod_{k=1}^H(h_k)) = \frac{1}{1+\exp(-\prod_{k=1}^H(h_k))} \quad r = 1 \dots m \quad (5)$$

In Figure 2, the neuron activation functions of hidden layer use linear combination of previous features then summation passes through a linear activation function. The outputs of the hidden layer neurons are multiplied to construct the output of the network where these outputs are passed through a nonlinear activation function such as logistic, tangent hyperbolic etc. The most important difference is that the W_o weight parameters of the PSNN are fixed constant and not trained. Input data of the designed models are normalized to [0,1] interval and LM optimization is used to optimize their parameters. The output prediction performance of the models is calculated by RMSE given as

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\hat{e}(k)|^2} \quad (6)$$

where N is the number of the testing dataset and $\hat{e}(k) = y(k) - \hat{y}(k)$ is the prediction error of k^{th} index [13].

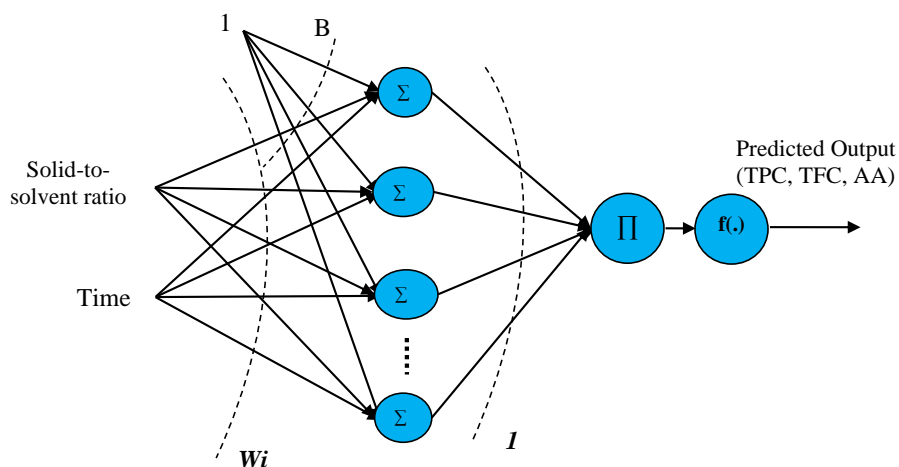


Figure 2. PSNN model.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Effect of extraction parameters on bioactive extracts

Extraction is a process in the recovery of bioactive compounds from natural sources. The extraction conditions depend on factors such as the extraction method to be used, solvent type, pH, temperature, sample-to-solvent ratio, and extraction time as well as the nature of the bioactive components to be extracted [25]. Therefore, it is necessary to know how these parameters affect the extraction efficiency in obtaining fenugreek seed extracts rich in phenolic compounds. In this study ten different solid-to-solvent ratios varied from 0.5-60 g/L were used at different extraction times keeping all other parameters constant. According to obtained results, at 5 g/L and 180 min, the highest values were determined as 12564.08±376.88 mg gallic acid/100 g dry sample, 7540.44±39.67 mg quercetin/100 g dry sample and 1904.80±17.43 mM Trolox/100 g dry sample for total phenolic compounds, total flavonoid content, and antioxidant activity, respectively. When the extraction studies with fenugreek seeds were examined, it was seen that the TPC of the fenugreek seed extracts obtained using organic solvents such as methanol, ethyl acetate and hexane was 942-10631.6 mg gallic acid/100g dry [6, 8]. In addition, using pure water only, the TFC value was determined as 1749 mg quercetin/100 g dry sample, and it was reported that TFC comprised approximately 37% of the total phenolics in fenugreek seeds [4]. In a different study, it was stated that fenugreek seeds can contain flavonoids up to 100 mg/g dry sample level depending on the climatic conditions of the region [26]. From this point of view, higher values than the literature obtained in the current study showed that water can be used as a successful solvent that contains a solution to the problem of solvent toxicity as well as being inexpensive, highly accessible and environmentally friendly.

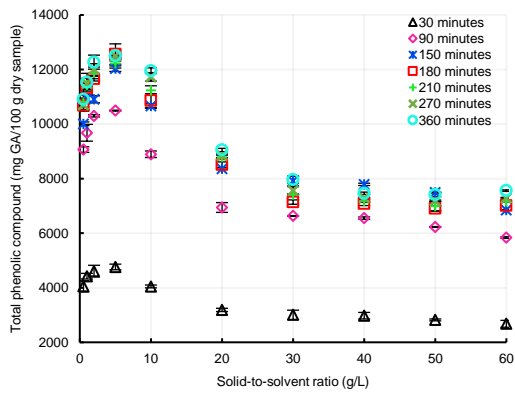
Fig 3a, Fig 3c and Fig 3e illustrate the effects of solid-to-solvent ratio on total phenolic compounds, total flavonoid contents, and antioxidant activity of fenugreek seeds. The amount of extractable phenolic compounds with antioxidant effect was increased by adjusting the solid-to-solvent ratio. It was seen that the amount of extracted phenolic compounds increased with increasing in the solid-to-solvent ratios up to a certain point (5 g/L), but then decreased and remained almost constant with the increase of the solid-to-solvent ratio (Fig 3). The concentration gradient between the vegetable tissue and the solvent is increased by increasing the amount of solvent for a fixed amount of solid matrix, resulting in a faster extraction rate [27]. Therefore, the increase in the amount of phenolic compounds in the extracts at increasing solid concentrations (up to 5 g/L) can be explained by the increase in concentration gradient. However, Wani et al. [36] stated that more gums could be extracted from the fenugreek samples rather than bioactive compounds if the distilled water is used as a solvent. Due to the increase in solid matter

content at high solid-to-solvent ratios (after 5 g/L), more gums were extracted, and highly viscous solutions were obtained during the process which may have affected the filtration process, resulting in lower TPC and TFC values. A similar trend of the TPC and TFC was observed for the AA of the samples which indicated that the phenolics and flavonoids were responsible for the antioxidant activity of the fenugreek seed extracts (Fig 3e). Hence, the literature studies [28-30] revealed that AA of fenugreek seed extract was highly correlated with TPC and TFC.

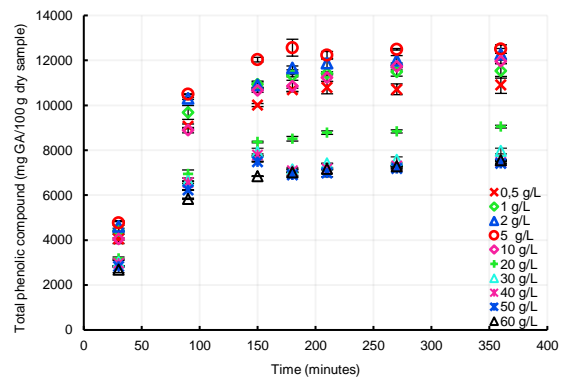
As can be seen from Figure 3b, Fig3d and Fig3f, the highest extraction rate was reached in the first 150 minutes. However, after this period, the extraction rate started to decrease and almost stabilized. As the concentration gradient decreases over time, the extraction yield starts to decrease with the increasing extraction times. Therefore, an excessive time is not needed to be able to extract more phenolic compounds from fenugreek seeds. Similar results observed in different extraction studies of phenolic compounds [31-33].

3.2. Predictive modeling of extraction process

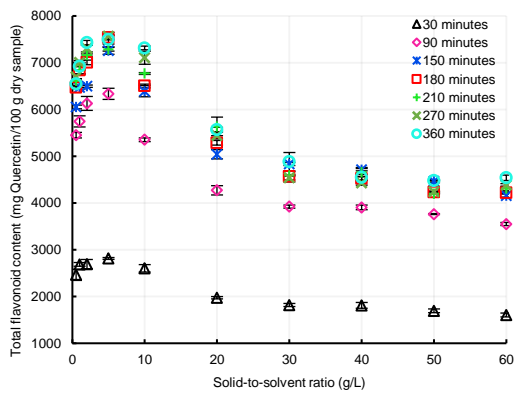
Artificial neural network (ANN) modeling is a challenging method in the estimation and prediction process parameters and food properties in a broad spectrum such as estimation of coumarin extraction yield from *Cuscuta reflexa* [34], prediction of particle size and polydispersity index of phenolic compound-loaded nanosystems [24], microwave-vacuum drying characteristic of carrot [35], and etc. In this study, there are performed 70 experiments with different time periods and concentration rates such that modeling of phenolic compounds for the extraction process is achieved based on all data sets or experiments instead of one-by-one time periods and solid-to-solvent ratios. It means that the designed models correspond to all cases of the extraction process. In the future, anyone can predict an estimate of phenolic compound output for a different combination of the solid-to-solvent ratio and time. Table 1 shows the RMSE and RMSE (%) performance results of the prediction errors for all modeling experiments. Remember that the ANN is the one hidden-layered conventional neural-network, PSNN is also one hidden layered higher-order neural-network with different functionalized outputs. RMSE results indicate a mean error per data calculated by Equation (6). However, $RMSE (\%) = \frac{RMSE}{\max(|y|)} \times 100$ shows how large the obtained RMSE is relative to the maximum value of the output. RMSE value can be considered relatively large for a neural-network prediction but, its RMSE (%) is very small which shows that very acceptable predictions are obtained for the modeling of the extraction experiments. In other words, designed models have a high learning and generalization capability for the extraction process. Although it has fewer parameters, PSNN was shown here with experimental results that it predicts much better than standard ANN, and it is predicted to be used in future food processes.



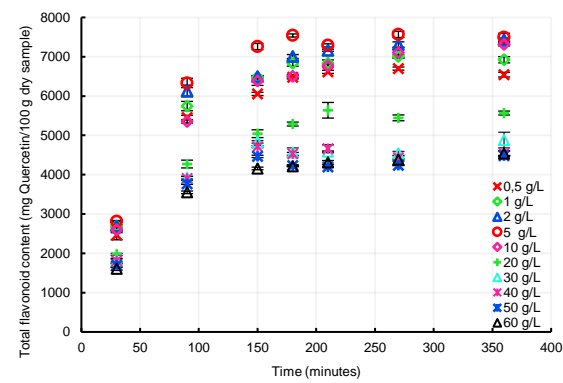
(a) solid-to-solvent ratio vs. TPC



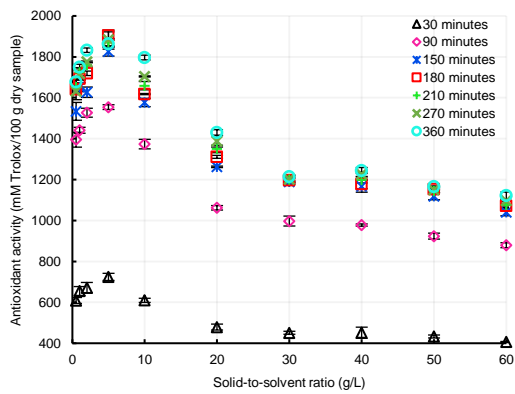
(b) time vs. TPC



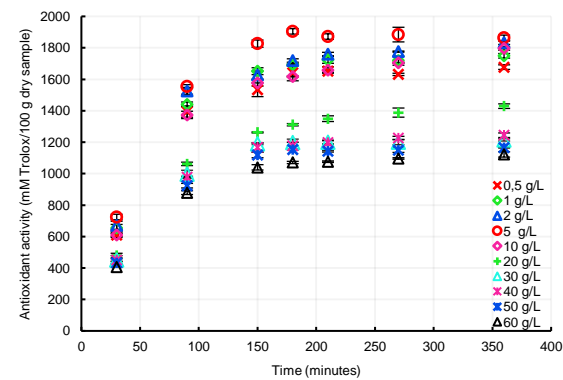
(c) solid-to-solvent ratio vs. TFC



(d) time vs. TFC



(e) solid-to-solvent ratio vs. AA



(f) time vs. AA

Figure 3. Experimental results (a-b) total phenolic compounds (TPC), (c-d) total flavonoid content (TFC), (e-f) antioxidant activity (AA).

Table 1. RMSE performances of neural networks.

		<i>For Training Data</i>			<i>For Testing Data</i>		
		TPC	TFC	AA	TPC	TFC	AA
ANN	RMSE	142.02	212.12	16.28	178.95	201.87	24.20
	RMSE (%)	1.13	2.80	0.85	1.42	2.67	1.27
PSNN	RMSE	118.75	66.93	15.92	163.19	96.67	20.23
	RMSE (%)	0.94	0.87	0.83	1.30	0.27	1.06

Figure 4 illustrates modeling and prediction results where the collected data of the extraction experiments are divided into two parts as training and testing parts. The training dataset has 50 data points, testing dataset has 20 data points where both randomly chosen from the experiments. Then, modeling and prediction results are plotted according to randomly selected datasets. Notice that we did not use validation dataset for the structural design of the neural networks instead, we applied grid-search for the model design. According to the grid search of parameter space, optimal neural-networks models are obtained as follows: i) ANN has 1 hidden layer with 30 neurons and totally 90 weighting parameters, PSNN has 1 hidden layer with 10th order output neuron then there exist totally 30 weighting parameters, respectively. Figure 4a and Figure 4b demonstrate the prediction results of TPC for training and testing samples. There is seen that 7 experiments exist with 10 data points where data points are taken in cascade form. In the extremum points of the TPC, there are relatively large prediction errors. Figure 4c and Figure 4d show the prediction results of TFC. Note that all plots are obtained by PSNN model with 10th order. In the TFC modeling, the same random points are used for training and testing, but small RMSE errors are calculated. From Figure 3, it is seen that the changes on the TFC data are relatively small compared to the TPC and AA therefore ANN models can easily approximate and predict the future values. Figure 4e and Figure 4f give the prediction results of AA. Even though training data points are modeled with the smallest RMSE performances, the RMSE results of testing are large. In general, it is provided that all RMSE results are less than 1.3% which is very acceptable for future applications.

4. CONCLUSIONS

This study presents two important results. The first is the investigation of the effects of solid-to-solvent ratio and time on the extraction of phenolic compounds. Although the amount of phenolic compounds and antioxidant capacity obtained at different solid-to-solvent ratios and times vary, quite high amounts of phenolic compounds were obtained in the applied process. The experimental results showed that even if only water is used as a solvent, fenugreek seed extracts containing high amount of bioactive components can be obtained by adjusting the solid-to-solvent ratios and processing time. These extracts can be used for the development of functional foods and/or pharmaceutical industry for their health benefits if the extraction process can be scaled up. The second is modeling and estimation of the extraction processes with two different neural-network models such as standard ANN and PSNN. By simulating the extraction process with the created ANN models, bioactivity can be predicted for different conditions, thus facilitating the transfer of processes to a large scale. In addition, modeling and prediction are needed to obtain optimal phenolic compounds for automatic extraction processes.

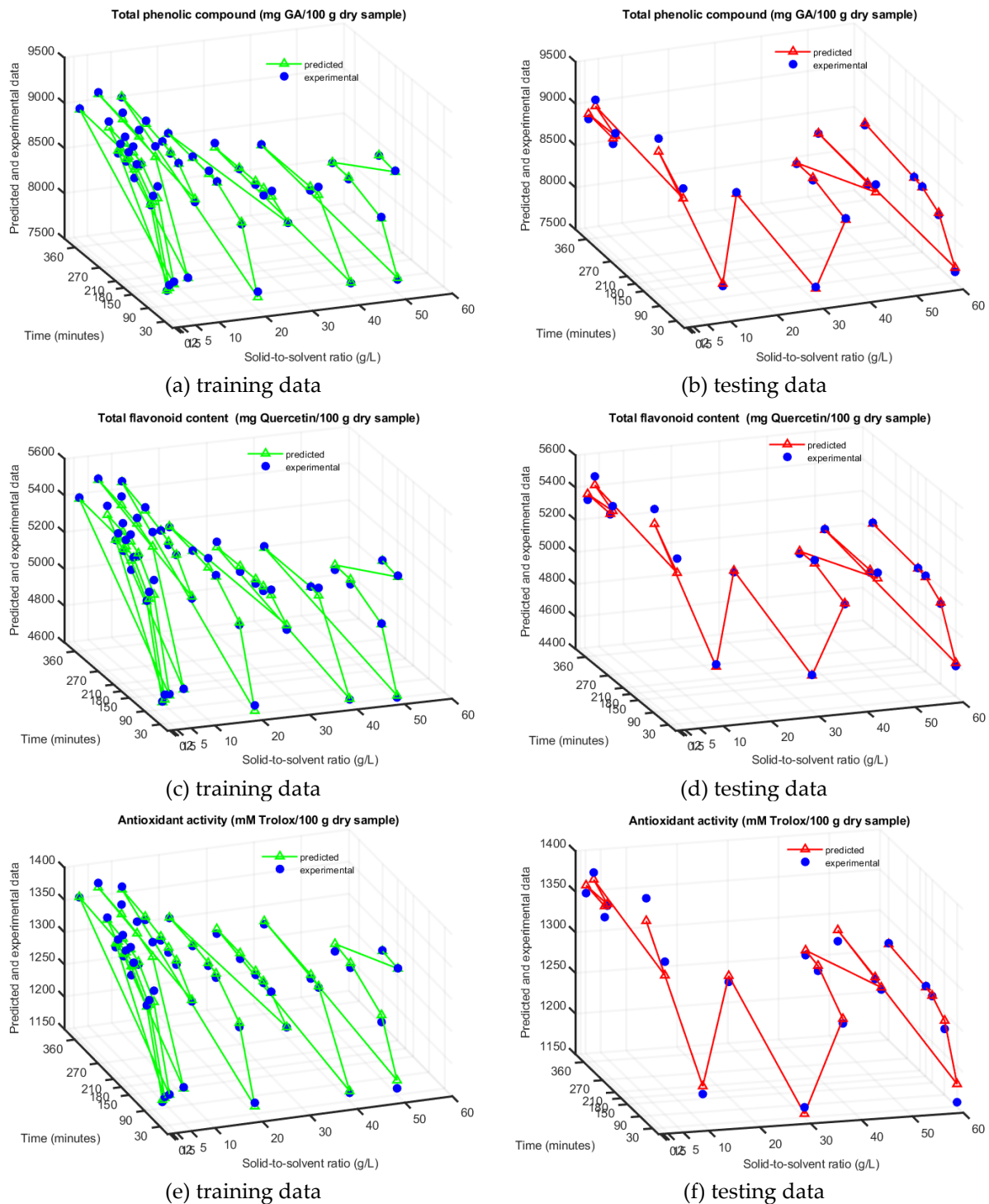


Figure 4. Prediction of (a-b) total phenolic compounds (TPC), (c-d) total flavonoid content (TFC), (e-f) antioxidant activity (AA)

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

Selami BEYHAN: The author conducted modelling and analysis of data and edited the article.

Hilal İŞLEROĞLU: The author performed real-time experiments 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

- [1] Baba WN, Tabasum Q, Muzzaffar S, Masoodi FA, Wani I et al., "Some nutraceutical properties of fenugreek seeds and shoots (*Trigonella foenum-graecum* L.) from the high Himalayan region", *Food Bioscience* 2018; 23: 31–37.
- [2] Yao D, Zhang B, Zhu J, Zhang Q, Hu Y et al., "Advances on application of fenugreek seeds as functional foods: Pharmacology, clinical application, products, patents and market", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2020; 60 (14): 2342-2352.
- [3] Naidu MM, Shyamala BN, Naik JP, Sulochanamma G, Srinivas P., "Chemical composition and antioxidant activity of the husk and endosperm of fenugreek seeds", *LWT-Food Science and Technology* 2011; 44, 451–456.
- [4] Dixit P, Ghaskadbi S, Mohan H, Devasagayam TP., "Antioxidant properties of germinated fenugreek seeds", *Phytotherapy Research* 2005; 19 (11): 977-983.
- [5] Srinivasan K. Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*): A review of health beneficial physiological effects. *Food Reviews International* 2006; 22 (2): 203-224.
- [6] Belguith-Hadriche O, Bouaziz M, Jamoussi K, Simmonds MSJ, El Feki A. et al., "Comparative study on hypocholesterolemic and antioxidant activities of various extracts of fenugreek seeds", *Food Chemistry* 2013; 138: 1448–1453.
- [7] Mukthamba P, Srinivasan K. "Hypolipidemic and antioxidant effects of dietary fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) seeds and garlic (*Allium sativum*) in high-fat fed rats", *Food Bioscience* 2016; 14: 1–9.
- [8] Kenny O, Smyth TJ, Hewage CM, Brunton NP., "Antioxidant properties and quantitative UPLC-MS analysis of phenolic compounds from extracts of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) seeds and bitter melon (*Momordica charantia*) fruit", *Food Chemistry* 2013; 141 (4): 4295-4302.
- [9] Khorshidian N, Yousefi Asli M, Arab M, Adeli Mirzaie A, Mortazavian AM., "Fenugreek: potential applications as a functional food and nutraceutical", *Nutrition and Food Sciences Research* 2016; 3(1): 5-16.
- [10] Yadav R, Chowdhury P., "Screening the Antioxidant activity of *Trigonella Foenum graecum* seeds", *International Journal of Pharmaceutical Research and Applications* 2017; 2(1): 65-70.

- [11] Nayak J, Vakula K, Dinesh P, Naik B, Pelusi D., "Intelligent food processing: Journey from artificial neural network to deep learning", *Computer Science Review* 2020; 38: 100297.
- [12] Shin Y, Ghosh J., "The pi-sigma network: An efficient higher-order neural network for pattern classification and function approximation", In: *Proceedings IJCNN-91-Seattle international joint conference on neural networks* 1991; 1: 13-18.
- [13] Bas E, Grosan C, Egrioglu E, Yolcu U., "High order fuzzy time series method based on pi-sigma neural network", *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2018; 72: 350-356.
- [14] Nayak SC., "Development and performance evaluation of adaptive hybrid higher order neural networks for exchange rate prediction", *International Journal of Intelligent Systems and Applications* 2017; 9 (8): 71-85. 10.5815/ijisa.2017.08.08
- [15] Oguzhan Y, Bas E, Egrioglu E., "The training of pi-sigma artificial neural networks with differential evolution algorithm for forecasting", *Computational Economics* 2022; 59: 1699–1711.
- [16] Ghazali GR, Hussain AJ, Liatsis P, Tawfik H., "The application of ridge polynomial neural network to multi-step ahead financial time series prediction", *Neural Computing and Applications* 2008; 17: 311-323.
- [17] Kang Q, Fan Q, Zurada JM., "Deterministic convergence analysis via smoothing group Lasso regularization and adaptive momentum for Sigma-Pi-Sigma neural network", *Information Sciences* 2021; 553: 66-82.
- [18] Ciric A, Krajnc B, Heath D, Ogrinc N., "Response surface methodology and artificial neural network approach for the optimization of ultrasound-assisted extraction of polyphenols from garlic", *Food and Chemical Toxicology* 2020; 135: 110976.
- [19] Muzolf-Panek M, Kaczmarek A, Gliszczyńska-Świągło A., "A predictive approach to the antioxidant capacity assessment of green and black tea infusions", *Journal of Food Measurement and Characterization* 2021; 15:1422–1436.
- [20] Rebollo-Hernanz M, Cañasa S, Taladrid D, Segovia A, Bartolomé B et al., "Extraction of phenolic compounds from cocoa shell: Modeling using response surface methodology and artificial neural networks", *Separation and Purification Technology* 2021; 270: 118779.
- [21] Kadiri O, Gbadamosi SO, Akanbi CT., "Extraction kinetics, modelling and optimization of phenolic antioxidants from sweet potato peel vis-a-vis RSM, ANN-GA and application in functional noodles", *Journal of Food Measurement and Characterization* 2019; 13:3267–3284.
- [22] Pavlic B, Kaplan M, Bera O, Olgun EO, Canli O, et al., "Microwave-assisted extraction of peppermint polyphenols – Artificial neural networks approach", *Food and Bioproducts Processing* 2019; 118: 258-269.
- [23] Curko N, Kelšin K, Dragović-Uzelac V, Valinger D, Tomašević M, et al., "Microwave-assisted extraction of different groups of phenolic compounds from grape skin pomaces: modeling and optimization", *Polish Journal of Food and Nutrition Science*. 2019; 69(3): 235–246.
- [24] Espinosa-Sandoval LA, Cerqueira MA, Ochoa-Martínez CI, Ayala-Aponte AA., "Phenolic compound-loaded nanosystems: artificial neural network modeling to predict particle size, polydispersity index, and encapsulation efficiency", *Food and Bioprocess Technology* 2019; 12(8): 1395-1408.
- [25] Abcha I, Criado P, Salmieri S, Najjaa H, Isoda H, et al., "Edible *Rhus tripartita* fruit as source of health-promoting compounds: characterization of bioactive components and antioxidant properties", *European Food Research and Technology* 2019; 245:2641–2654.
- [26] Gupta R, Nair S., "Antioxidant flavonoids in common Indian diet.", *South Asian Journal of Preventive Cardiology* 1999; 3: 83-94.
- [27] Esclapez MD, Garcia-Perez JV, Mulet A, Carcel JA., "Ultrasound-assisted extraction of natural products", *Food Engineering Reviews* 2011; 3: 108–120.
- [28] Bukhari SB, Bhangar MI, Memon S., "Antioxidative Activity of Extracts from Fenugreek Seeds (*Trigonella foenum-graecum*)", *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry* 2008; 9(2): 78-83.

- [29] Mashkor IM., "Phenolic content and antioxidant activity of fenugreek seeds extract", *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research* 2014; 6(4): 841-844.
- [30] Dastan S, Türker İ, İşleröglü H., "Çemen otu tohumundan fenolik bileşenlerin ekstraksiyonu için optimizasyon çalışması", *Gıda* 2021; 46(4): 959-970.
- [31] Casazza AA, Aliakbarian B, Perego P., "Recovery of phenolic compounds from grape seeds: effect of extraction time and solid-liquid ratio", *Natural Product Research* 2011; 25(18): 751-1761
- [32] Hismath I, Wan Aida WM, Ho CW., "Optimization of extraction conditions for phenolic compounds from neem (*Azadirachta indica*) leaves", *International Food Research Journal* 2011; 18: 931-939.
- [33] Chaalal M, Touati N, Louaileche H., "Extraction of phenolic compounds and in vitro antioxidant capacity of prickly pear seeds", *Acta Botanica Gallica: Botany Letters* 2012: 159(4): 467-475
- [34] Mitra P, Barman PC, Chang KS., "Coumarin extraction from *cuscuta reflexa* using supercritical fluid carbon dioxide and development of an artificial neural network model to predict the coumarin yield", *Food Bioprocess Technol* 2011; 4: 737-744.
- [35] Sun Q, Zhang M, Mujumdar AS, Yang P., "Combined LF-NMR and artificial intelligence for continuous real-time monitoring of carrot in microwave vacuum drying", *Food and Bioprocess Technology* 2019; 12: 551-562.
- [36] Wani SA, Bishnoi S, Kumar P., "Ultrasound and microwave assisted extraction of diosgenin from fenugreek seed and fenugreek-supplemented cookies", *Journal of Food Measurement and Characterization* 2016; 10(3): 527-532.
- [37] Singleton VL, Rossi JA., "Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents", *American Journal of Enology and Viticulture* 1965; 16(3): 144-158.



CİHANBEYLİ-CELİL BOĞAZI (KONYA) PERİ BACALARININ ARAŞTIRILMASI VE FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

¹Niyazi BİLİM , ²Bilgehan KEKEÇ , ^{3*}Emre KARAKAYA , ⁴Özer KARAKAYACI 

^{1,2,3}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

⁴Konya Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹nbilim@ktun.edu.tr, ²bkekec@ktun.edu.tr, ³ekarakaya@ktun.edu.tr, ⁴okarakayaci@ktun.edu.tr

Önemli Katkıları (Highlights)

- Türkiye'nin en büyük dördüncü peribacası olan Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacaları hakkında ilk kez makale yazılarak bu sit alanını hakkında önemli bilgiler verilmiş ve bu bölgenin tanıtımı yapılmıştır.
- Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarını oluşturan ana kayacın mineralojisi, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.
- Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarını oluşturan ana kayacı aşındıran etmenlerin neler olabileceği hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.
- Bu bölgenin jeopark ilan edilmesi, daha çok yeşillendirilmesi, bölgeyi korumak için güvenlik kollarının görevlendirilmesi, bölgeye yakın konumda yaşayan halkın bölgenin önemi hakkında bilgilendirilmesi ve turizme açılması, jeoçik miras olan Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarının hem korunmasını, hemde tanıtılması gerektiği üzerinde vurgu yapılmıştır.



ÇİHANBEYLİ-CELİL BOĞAZI (KONYA) PERİ BACALARININ ARAŞTIRILMASI VE FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

¹Niyazi BİLİM , ²Bilgehan KEKEÇ , ³Emre KARAKAYA , ⁴Özer KARAKAYACI 

^{1,2,3}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

⁴Konya Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹nbilim@ktun.edu.tr, ²bkekec@ktun.edu.tr, ³ekarakaya@ktun.edu.tr, ⁴okarakayaci@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 27.12.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.01.2023)

ÖZ: Cihanbeyli (Konya) sınırları içerisinde bulunan Kuşça bölgesindeki peribacası türündeki jeolojik oluşumlar, doğal güzellik yönünden görülmeye değer olup bölge turizmi açısından çok yüksek potansiyele sahiptir. Doğal miras özelliği bulunan bu tür jeolojik oluşumların ayrıntılı bir şekilde araştırılarak turizm potansiyellerinin belirlenmesi ve bölgeye bir jeopark statüsünün kazandırılmasının sağlanması önemli bir konudur. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada, bölgede bulunan peri bacası oluşumlarından alınan kayaç örnekleri üzerinde ince kesit analizi ve bazı fiziko-mekanik deneyler yapılarak analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Cihanbeyli-Celil Boğazı Peribacalarını oluşturan kayacın, jeolojik tanımının kumtaşı (vake taşı) ya da dismikrit olduğu ince kesit analizi sonucunda anlaşılmıştır. Bu çalışmada örnek teşkil eden kumtaşı numuneleri üzerinde yapılan fiziko-mekanik deneyler neticesinde elde edilen veriler incelendiğinde, kumtaşı örneklerinin sertlik değerlerinin 18,40 olduğu belirlenmiş olup, "az yumuşak" sınıfta olduğu tanımlanmıştır. ISRM 1981'in önerdiği yöntemlere uygun olarak yapılan yoğunluk ve porozite belirleme deneyleri neticesinde kumtaşı örneklerinin düşük yoğunluklu ve yüksek porozite özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı test sonuçlarına göre kumtaşı örneklerinin ortalama tek eksenli basınç dayanımının 8,09 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre peri bacasını temsil eden kumtaşı, "düşük dayanımlı" bir kayaç olarak tanımlanmıştır. Nokta yükleme dayanımı test sonuçları incelendiğinde kumtaşı örneklerinin ortalama nokta yükleme dayanımının 1,16 MPa olduğu saptanmış olup, "düşük dirençli" kayaç kategorisinde olduğu belirlenmiştir. Bölgeden alınan kumtaşı örnekleri üzerinde ISRM 1981'in önerdiği yöntemlere uygun olarak gerçekleştirilen suda dağılma dayanımı neticesinde örnek kumtaşı kayaçlarının suda dağılmaya karşı göstermiş olduğu direncin "yüksek" olduğu belirlenmiştir. Cihanbeyli-Celil Boğazı Peribacalarını oluşturan kayaç numuneleri üzerinde yapılan test sonuçları bütün olarak düşünüldüğünde düşük yoğunluk gösteren, yüksek poroziteli, düşük mekanik özelliklere sahip tipik bir kumtaşı özellikleri taşıyan kayaçlar oldukları belirlenmiştir. Bu sayede Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacaları oluşumları hakkında önemli bilgiler edinilmiş ve bu jeolojik oluşumu tanıtmaya çalışmaları adına ilk adımlar atılmıştır. Yapılan çalışma ile bölgenin tanıtımı amaçlanmış ve bölgenin jeolojik yapısının jeopark olarak nitelendirilme potansiyeli değerlendirilmiştir..

Anahtar Kelimeler: Cihanbeyli (Konya), Peri Bacaları, Jeolojik Sit, Jeopark, Jeolojik Miras, Kumtaşı, Jeoloji ve Madencilik

Investigation of Fairy Chimneys of Cihanbeyli-Celil Strait (Konya) and Determination of Physico-Mechanical Properties

ABSTRACT: Fairy chimney-type geological formations in the Kuşça region within the borders of Cihanbeyli (Konya) are worth seeing in terms of natural beauty and have a very high potential in terms of regional tourism. It is an important issue to determine the tourism potentials of such geological formations, which have natural heritage characteristics, in detail, and to provide the region with a jeopark status. For

*Corresponding Author: Emre KARAKAYA, ekarakaya@ktun.edu.tr

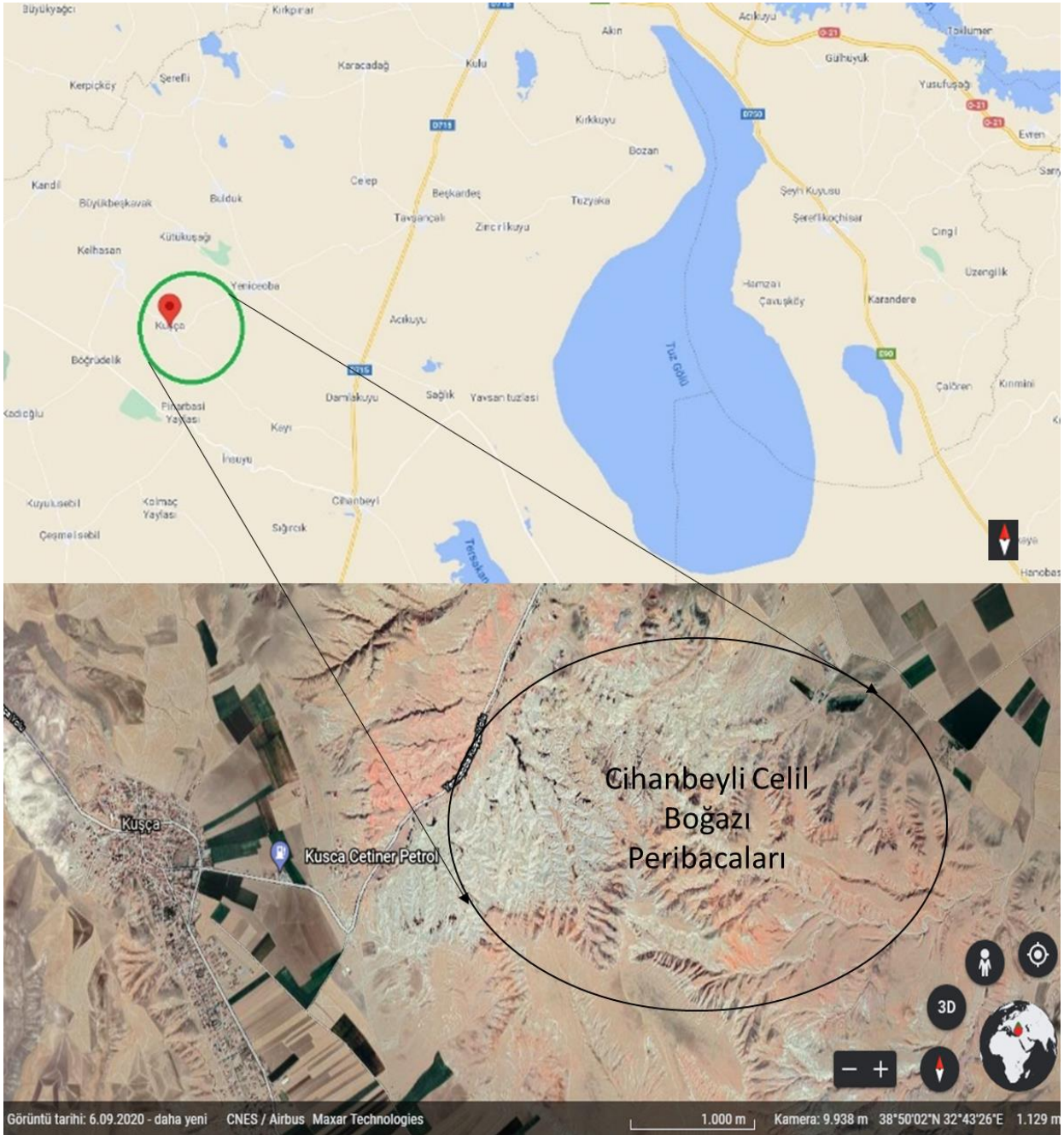
this purpose, in this study, thin section analysis and some physico-mechanical experiments were carried out on the rock samples taken from the fairy chimney formations in the region, and the analysis results were evaluated. The geological definition of the rock forming the Cihanbeyli-Celil Strait Fairy Chimneys was found to be sandstone (wake stone) or dismicrite as a result of thin section analysis. It was determined to be 40, and it was defined as being in the "less soft" class. As a result of the density and porosity determination experiments performed in accordance with the methods suggested by ISRM 1981, it was determined that the sandstone samples had low density and high porosity properties. According to the uniaxial compressive strength test results, it was determined that the average uniaxial compressive strength of the sandstone samples was 8.09 MPa. According to this result, the sandstone representing the fairy chimney was defined as a "low strength" rock. When the point loading strength test results were examined, it was determined that the average point loading strength of the sandstone samples was 1.16 MPa, and it was determined that it was in the "low resistance" rock category. As a result of the slake durability resistance performed on the sandstone samples taken from the region in accordance with the methods suggested by ISRM 1981, it was determined that the resistance of the sample sandstone rocks to dispersion in water was "high". When the test results on the rock samples forming the Cihanbeyli-Celil Gorge Fairy Chimneys are considered as a whole, it has been determined that they are low density, high porosity, low mechanical properties and typical sandstone rocks. In this way, important information was obtained about the formations of the Cihanbeyli-Celil Strait fairy chimneys and the first steps were taken to introduce this geological formation. The aim of the study was to introduce the region and the potential of the region's geological structure to be described as a geopark was evaluated.

Keywords: *Cihanbeyli (Konya), Fairy Chimneys, Geological Site, Geopark, Geological Heritage, Sandstone, Geology and Mining*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Jeodinamik modellere (manto konveksiyonunun levha hareketlerine ve deniz tabanının yayılmasına, dağ oluşumu, volkanlar, depremler ve fay oluşumu gibi jeolojik fenomenler) göre Anadolu neotektoniği Avrasya ve Afrika kıtalarının çarpışması sonucu gelişmiştir [23], [7], [27]. Türkiye'deki geniş volkanik kuşak (Batı Anadolu, İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri aynı zamanda Neojen ve Kuaterner volkanizmasının da yer aldığı bölgeler), Miyosen ve Kuvaterner jeolojik zamanlarında gelişmiştir. Anadolu bloğunun yanı sıra Avrupa, Afrika ve Arap plakalarını içine alan aktif sınırlar arasında konumlanmıştır. Türkiye'deki volkanizmanın kökeni, yaşı ve tektonik ilişkileri birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir [17], [28], [29], [25], [30], [31], [26], [22].

Kuşça beldesi, Konya'nın kuzeyinde, Cihanbeyli ilçesinin kuzey-batısında 50 km² lik bir alanda yer almaktadır. Bölgenin deniz seviyesinden yüksekliği ortalama 1200 m civarındadır. İnceleme alanı Konya il merkezine 130 km, Cihanbeyli ilçe merkezine ise 30 km uzaklıkta yer almaktadır. Bölgede, yazlar kurak ve sıcak, kışlar soğuk ve sert seyretmektedir. Kuşça'nın kuzeyinde Kelhasan ve Kütükkuşağı, güneyinde İnsuyu ve Kayı, batısında Böğrüdelik ve doğusunda Yeniceoba köyleri yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarının yer bulduru haritası (yaklaşık olarak 1000 m ölçekli haritada, 38°50'02"N-, 32°43'26"E)

Figure 1. Location map of the Cihanbeyli-Celil Strait fairy chimneys (approximately on a 1000 m scale map, 38°50'02"N-, 32°43'26"E)

Kuşça mahallesine yaklaşık 2 km mesafede yer alan Celil Mahallesi civarında peribacası oluşumları bulunmaktadır. Kuşça formasyonu olarak adlandırılan birimin yaşı Üst Miyosen-Orta Eosen olarak tanımlanmaktadır. Orta-kalın katmanlı, orta tutturulmuş, çakıltası, çamurtaşı, kiltası, kumtaşı, killi kireçtaşı ve volkanik küllerden oluşan bu formasyon gri ve beyaz alacalı, yeşil, kırmızı, sarımsı kahve renklerle karakteristiktir. Birimin kayaç türü, mineralojik ve yapısal özellikleri yanında bitki örtüsü, yağış şiddeti, nispi yükselti farkı peri bacası oluşumu için önemli faktörlerdendir [1].

Peribacaları genelde yarı kurak ve kurak iklime sahip alanlarda görülen, volkanik kayaç ve tüfleri ya da kırıntılı sedimanter kayaçların yaygın olduğu yerlerde farklı formlarda ayrışması sonucu ortaya çıkan doğal şekillerdir [6], [21], [3], [10], [8], [11], [15].

Peribacaları genellikle koni, silindir, piramit, kule şeklinde olmakla birlikte tepeleri yuvarlak, şemsiyeli, sivri geometriye sahiptirler. Peribacalarının yüksekliği birkaç metreden başlayıp 15-20 m yüksekliğe kadar çıkmaktadır [21].

Kuşça mahallesine 2 km uzaklıkta bulunan Celil Boğazı peri bacaları Cihanbeyli Belediyesinin kısıtlı imkânları ile korunmaya ve tanıtılmaya çalışılmaktadır. Ancak kısıtlı korumadan kaynaklı olarak, bölgedeki jeolojik değerlerde yüzeysel aşınmanın yanısıra; bölgedeki insanlar belli zamanlarda, peri bacaları oluşumlarını patlayıcı madde ve çeşitli kazıcı araçlarla tahrip edip ortaya çıkan kaya maddesini yapı malzemesi olarak kullanmışlardır. Bölgenin erezyona, dış etmenlere karşı korunaklı hale getirilmesi, bu jeolojik mirasın nesilden nesile aktarımında önemli rol oynayacaktır. Erozyonun engellenebilmesi için bölgesel ağaçlandırma, insan kaynaklı dış etkileri için ise bölgenin hızlı bir şekilde koruma bölgesi olarak nitelik kazandırılmasıyla sağlanabilecektir. Bölge birçok jeosit alanı içermekle birlikte birçok eski yerleşim yeri olan mağara içermektedir. Bu jeolojik doğa harikası oluşumun, tanıtımı yapılarak ülke turizmine kazandırılması, jeopark haline getirilerek gelecek nesillere jeolojik miras alanı olarak bırakılması gerekmektedir. Jeoparklara ilgi son zamanlarda artış göstermekte olup, ziyaretçi sayısı ve bu tür bölgelerdeki planlamalar doğru yapıldığı takdirde bölgede ekonomik canlılık, istihdam artışı ve kırsal kalkınma gibi bir çok pozitif etki bırakacağı öngörülmektedir.

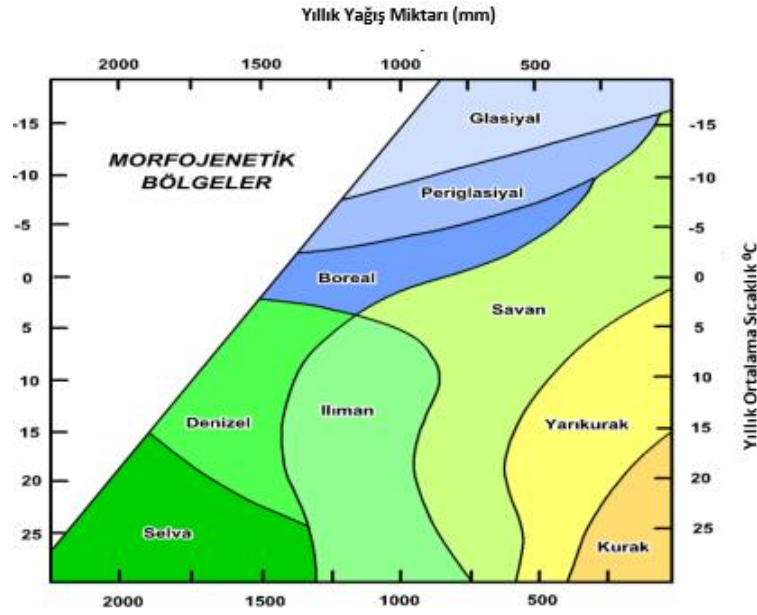
Bu çalışmada, inceleme alanında yer alan peribacalarının öncelikle bölge halkına tanıtımı amaçlanmıştır. Bu sayede bölgenin koruma altına alınabilmesi ve dış kaynaklı etkilerden zarar görmemesi hedeflenmektedir. Kaya birimlerinin mühendislik özellikleri, kayaçların dış etkiler karşısında (sıcaklık farkı, yağış, donma - çözünme, tuz kristallenmesi gibi) direncinin bir ölçüsü olarak ifade edilebilir. Çalışmada, bölge kayaçlarının aşınma direncini, dayanımlarını ve mühendislik özelliklerini ortaya koymak amacıyla, numuneler üzerinde yapılmış bazı fiziksel ve mekanik deneylerin sonuçları sunulmaktadır.

1.1. Kuşça peri bacaları (Kuşça fairy chimneys)

Kapodokya, Afyon ve Narman peribacalarından sonra Türkiye'nin 4. büyük peribacası oluşumu, Konya İli, Cihanbeyli İlçesi sınırları içerisinde bulunan Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacaları'dır [4].

Geç Miyosen-Erken Pliyosen döneminde (günümüzden yaklaşık 20 milyon yıl önce), bugünkü Konya Ovası'nın büyük bölümünü ve Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarının yer aldığı alanı kaplayan ismi kaynaklarda geçmeyen büyük bir deniz yer almaktaydı. Bu denizin epirojenik hareketler sonucu bağlantısı kesilmiş ve bir iç deniz çukuru oluşmuştur. Daha sonra bu iç denizin iklim koşulları sonucu geri çekilmesi neticesinde bu iç deniz yerini geçici göllere bırakmıştır. Bu lagünlerde kırıntılı, kalın karasal seriler yanında, kurak ve yarı kurak iklim koşullarındaki buharlaşma sonucu jips yatakları da oluşmuştur. Bunun yanı sıra peribacalarının bulunduğu alanın 5 ila 10 km uzağında, yerin yüzlerce metre altındaki tuz domlarından çözelti madenciliği yöntemi ile kaya tuzu üreten bir tesis yer almaktadır ve bu tuz domları; denizin çekilmesiyle oluşan dağlar arasındaki çorak basenlerde tuzlu bataklık ve göller meydana gelmesi, akarsuların yataklarında da kırıntılı oluşuklar depolanmış olması ve playa olarak adlandırılan geçici göllerde jips ve diğer evaporitler çökmesi ile oluşmuştur.

Marn, killi kireçtaşı, kıltaşı ve çakıltaşları gibi göl çökellerinin yanında aglomeralar içinde büyük kaya bloklarının yer aldığı volkanik akıntılar Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarının jeolojik yapısını oluşturmaktadır. Aglomera ve çakıltaşı birimleri aşınmaya karşı dirençliyen, kumtaşı içerikli göl çökelleri daha kolay aşınmaktadır. Şekil 12'de yer alan ve bölgeye ait olan 2022 yılındaki sıcaklık ve yağış grafikleri incelendiğinde, bölgede yıllık yağış miktarı yaklaşık 200 mm'dir. Bölgedeki yıllık ortalama sıcaklık ise yaklaşık 13 °C'dir. Peltier diyagramına göre bölge, yarıkurak bir bölge niteliği taşımakla birlikte bölgedeki peribacalarının ayrışma-bozuşmasında daha çok yarıkurak iklimin daha etkili olduğu görülmektedir (Şekil 2), [14].



Şekil 2. Peltier'e göre bölgeler diyagramı

Figure 2. Zones diagram according to Peltier

Celil Boğazı peribacaları öncelikle yağmur sularının formasyon içerisindeki çatlakları oyması ile başlamış olup, sonrasında rüzgar ile şekillenmiştir [16]. Şekil 2'de aşınmayı gözler önüne seren, Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacaları'ndan bir örnek görülmektedir. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarındaki faylanmanın oluşturduğu ezik ve çatlaklı zonlar daha kolay aşınmış, ezik ve çatlak zonları dışında kalan kesimler ise daha yavaş aşınmıştır. Binlerce yıl süren bu aşınma sonucunda şapkalı doğal anıt görünümüne şekiller ortaya çıkmıştır. Bölgede yer alan peribacalarının boyu 4 ila 5 m arasında değişmektedir. (Şekil 3).



Şekil 3. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacaları'ndan bir peri bacasının ölçeklendirilmiş görünüşü

Figure 3. A scaled view of a fairy chimney from the Cihanbeyli-Celil Strait fairy chimneys

Eosen flişleri ve ofiyolitlerden kaynaklı çakıltaşı ve kumtaşları diğer birimlerden daha yaşlıdır ve genellikle karbonat çimentoludurlar [2]. Şekil 4'te Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarından bir görünüm yer almaktadır.



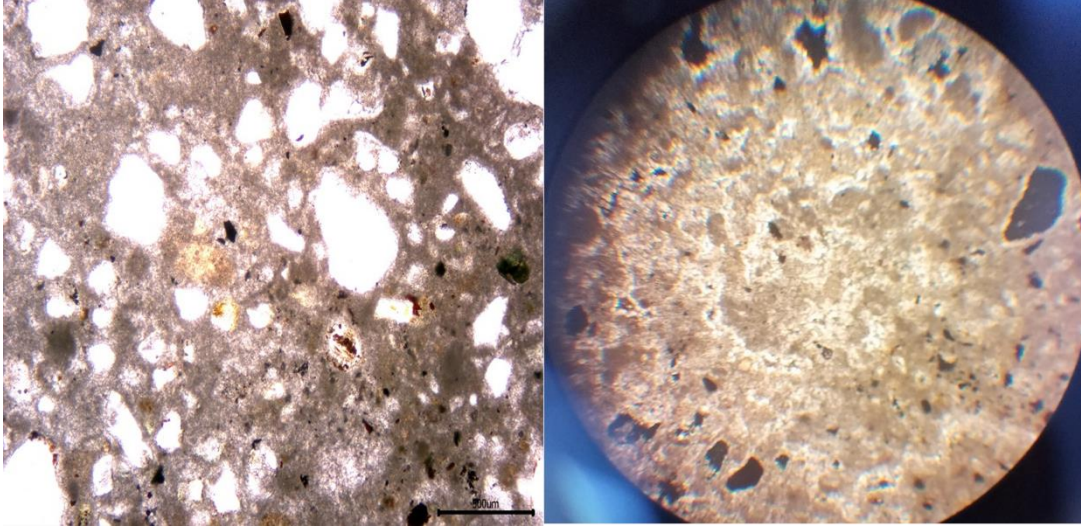
Şekil 4. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarından üsten genel görünüm (üstte), Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarından birine ait görünüm(alтта)

Figure 4. General view from the top of the Cihanbeyli-Celil Strait fairy chimneys (above), view of one of the Cihanbeyli-Celil Strait fairy chimneys (below)

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Çalışmada kullanılan kayacın tanımlanması (Identification of the rock used in the study)

Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarından alınan kaya örneklerinin mineralojik kayaç tanımlamasının yapılması için ince kesit örneği alınmıştır. Alınan ince kesit örneği Konya Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği bölümü tarafından ilgili yetkililer tarafından polarize mikroskop altında analiz edilmiştir. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarını temsil eden kayanın polarize mikroskop altındaki ince kesit görüntüleri aşağıda yer almaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarını temsil eden kayanın polarize mikroskop altındaki tek nikol ve çift nikoldeki ince kesit görüntüleri

Figure 5. Thin section images of the rock representing the Cihanbeyli-Celil Strait fairy chimneys in single and double nicol under polarized microscope

Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarını temsil eden kayanın bağlayıcısı mikrit olup allokem olarak %1-2 oranında intraklast mevcut olmakla birlikte %1 oranında ise zeolit ekstraklastı yer almaktadır. %1 oranında ise organik malzeme içermekle birlikte kaya birimi genel olarak mikritten oluşmaktadır. Folk, 1962'ye göre kaya "dismikrit" olarak adlandırırken Dunham, 1962'ye göre kaya tanımı Vera taşı olmaktadır [12], [9].

2.2. Laboratuvar çalışmaları (Laboratory studies)

Bu çalışmada Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarından Celil Boğazı peribacalarını oluşturan orjin kayalarından kayaç numuneleri temin edilerek örnekler alınarak Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Laboratuvarında ilgili kayaç numunelerinin özelliklerini belirlemek için bazı fiziko-mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Kuşça Peribacaları'nın bulunduğu bölge civarından temin edilen ve peri bacalarının olduğu kayaçları tasvir eden kayaç numuneleri üzerinde; Bunlar; doğal yoğunluk, porozitegörünür gözeneklilik, tek eksenli basınç dayanımı, suda dağılma dayanımı, nokta yükleme yükü dayanımı deneyleri olarak yapılmıştır sıralanabilir. Laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlara Deney sonuçlarından elde edilen sonuçlara göre, Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarını Kuşça Peribacaları'nı oluşturan ana kayacın fiziko -mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarından temin edilen numunelerin alındığı yerin harita üzerinde gösterimi aşağıda yer almaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarından alınan numunelerin konum olarak gösterimi
Figure 6. The location of the samples taken from the fairy chimneys of the Cihanbeyli-Celil Strait

Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacaları sit alanı olduğu için bu bölgeden temin edilen vake taşı numuneleri orjinlerini koruyacak şekilde geneli tasvir eder nitelikte, mühendislik tecrübelerine ve kaydelere bağlı olarak toplanmıştır. Temin edilen numunelerin yaklaşık olarak enlem, boylam ve rakımı aşağıda yer almaktadır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Temin edilen numunelerin yaklaşık olarak enlem, boylam ve rakımı

Table 1. Approximate latitude, longitude and altitude of the samples supplied

Numuneler	Enlem (°)	Boylam (°)	Rakım (m)
Numune-1	38,8265901	32,7234789	1183,42
Numune-2	38,8255901	32,7254989	1163,42
Numune-3	38,8256746	32,7251909	1215,28
Numune-4	38,8274147	32,7137681	1147,33
Numune-5	38,8263091	32,7161383	1162,45
Numune-6	38,8306664	32,7143732	1121,31

Temin edilen vake taşı örneklerinden laboratuvar ölçekli düşey eksenli karot alma makinesi ile karot alımı gerçekleştirilmiş ve alınan karotlar, numune kesme-boyutlandırma makinesi ile istenilen standartlara getirilmiştir (Şekil 7). Karot alma makinesi ile NX karot boyutunda yani yaklaşık 54 mm çapında örnekler hazırlanmıştır. Her bir deneyde 10 adet numune kullanılmış olup deneyler kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler ISRM 1981'in önerdiği yöntemler ışığında yürütülmüştür [19].

Şekil 7'de kayaç örneklerinden alınan karotlar ve kullanılan karot makinesine ait bir görsel bulunmaktadır.

Karot alma makinesi ile NX karot boyutunda yani yaklaşık 54 mm çapında örnekler hazırlanmıştır. Deneyler ISRM'81'in önermiş olduğu standartlar çerçevesinde yürütülmüştür.

Cihanbeyli-Celil Boğazı Kuşça Peribacaları'nın bulunduğu bölgeden civarından temin edilen alınan ve peri bacalarının olduğu kayaçları tasvir temsil eden kayaç numuneleri (vake taşı) üzerinde; doğal yoğunluk, porozitegörünür gözeneklilik, tek eksenli basınç dayanımı, suda dağılma dayanımı, nokta yükleme yükü dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sırasıyla anlatılmıştır ve sonuçlar tablolar halinde verilmiştir.

2.2.1. Schmidt sertliği belirleme deneyi (Schmidt hardness determination test)

Araziden elde edilen doğal taş bloklarından örnekler üzerinde Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan L Tipi Schmidt çekici (Şekil 8) kullanılarak kayaçların vake taşlarının sertlikleri ölçülmüştür.



Şekil 7. Kayaç örneklerinden alınan karotlar ve kullanılan karot alma makinesi

Figure 7. Cores taken from rock samples and the used core drilling machine



Şekil 8. Kayaç dayanımı bulmak için kullanılan L Tipi Dijital Schmidt çekici

Figure 8. L Type Digital Schmidt hammer used to find rock strength

Schmidt sertliği belirleme deneyi ISRM 1981'in önerdiği yöntemler ışığında gerçekleştirilmiştir [19]. Bölge kayaçlarından toplanan toplamda 6 adet vake taşı numunesi üzerinde gerçekleştirilen sertlik belirleme deneyleri sonucunda bölge kayaçlarının ortalama Schmidt sertlik değerinin 18,4 olduğu saptanmıştır. ISRM (1978) standartına (Çizelge 2) göre yorumlandığında kayaç tanımının **az yumuşak** sınıfında olduğu belirlenmiştir [18].

Çizelge 2. Schmidt çekicine göre kaya sertliğinin sınıflandırılması
Table 2. Classification of rock hardness according to Schmidt hammer

Schmidt Sertlik Değeri	Sınıflandırılması
0-10	Yumuşak
10-20	Az yumuşak
20-30	Az sert
30-40	Sert
40-50	Oldukça Sert
>60	Çok Sert

2.2.2. Yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi (Density and porosity determination experiment)

Yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi için , numune boyutları TS EN 1936'nin ön gördüğü deney standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Bu deneyde ilk olarak numunelerin hacimleri hesaplanmış olup, hacimleri belirlenen bu numunenelerin kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Kuru ağırlıkları belirlenen numunelere 48 saat süre ile suya doygun hale getirilmiş, doygun ağırlıkları ve su içerisindeki ağırlıkları belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler ile kayacın görünür gözeneklilik ve doğal yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Deney sonucunda, kayaçların ortalama yoğunluğu 1,27 gr/cm³, gözeneklilik derecesi ise % 43,57 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre kayaç düşük yoğunluklu ve yüksek poroziteye sahip tipik bir kumtaşı ya da vake taşı özelliği göstermektedir.

2.2.3. Tek eksenli basınç dayanım deneyi (Uniaxial compressive strength test)

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan numune boyutları ve deney prosedürü ISRM 1981'in önerdiği yöntemler ışığında yapılmıştır [19]. Toplamda 10 numune üzerinde tek eksenli basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Numunelerin boy/çap oranları 2.5–3.0 arasında seçilmiştir. Deneylerde Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği'nde bulunan 3000 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. 3000 kN kapasiteli hidrolik pres
Figure 9. Hydraulic press with 3000 kN capacity

Yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyleri neticesinde, kayaçların ortalama tek eksenli basınç dayanım değeri 8,09 MPa olarak belirlenmiştir. Tek eksenli basınç dayanım sonucu, ISRM (1981) göre yorumlandığında (Çizelge 3), peribacalarının düşük dayanımlı bir kumtaşı özelliği gösterdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 3. Tek eksenli basınç dayanımı deney sonucu sınıflaması

Table 3. Classification of uniaxial compressive strength test results

ISRM	
Tanımlama	Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa)
Çok düşük	<6
Düşük	6-10
Orta	20-60
Yüksek	60-200
Çok yüksek	>200

2.2.4. Nokta yükü dayanım deneyi (Point load strength test)

ISRM 1985'in önerdiği yöntemler ışığında göre gerçekleştirilen nokta yükü dayanımı deneyinde, numuneler boy/çap oranları 0,5-0,55 arasında boyutlandırılmıştır [20]. Nokta yükü dayanım deneylerinde, 10 adet numune hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde eksenel nokta yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 10). Yapılan deneyler sonucunda kayaların ortalama nokta yükü dayanım değeri 1,16 MPa olarak belirlenmiştir. Bieniawski (1975)'e göre Cihanbeyli-Celil Boğazı Peribacaları temsil eden kumtaşı numuneleri düşük dirençli kaya gurubundadır [5], (Çizelge 4).



Şekil 10. Nokta yükleme dayanım cihazının gösterimi
Figure 10. Illustration of point load strength device

Çizelge 4. Kayaların nokta yükü dayanımına göre sınıflandırılması

Table 4. Classification of rocks according to point load strength

Kaya Sınıfı	Is(50) (MPa)
Çok düşük dirençli	<1
Düşük dirençli	1-2
Orta dirençli	2-4
Yüksek dirençli	4-8
Çok yüksek dirençli	>8

2.2.5. Suda dağılma dayanım deneyi (Slake durability test)

Chandra (1970) tarafından önerilen suda dağılma dayanımı deneyi daha sonra Franklin ve Chandra (1972) tarafından geliştirilmiştir. Bu deney 1981 yılında standartlaşarak ISRM tarafından kaya

mekaniğinde yapılması önerilen testlerden biri haline gelmiştir. Deney 40-60 gr arasında toplam 10 adet yaklaşık küre şekilli numuneler hazırlanarak ISRM 1981'in önerdiği yöntemler ışığında gerçekleştirilmiştir [19]. Deneyler sonucunda I_{d-1} değeri % 96,60 ve I_{d-2} değeri ise 93,84 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre kayaların suda dağılmaya dayanımı "orta-yüksek" grubunda olduğu belirlenmiştir (Çizelge 5). Deney sonuçları Cihanbeyli-Celil Boğazı Peribacaları'nın suya karşı dağılmaya karşı gösterdiği dayanımın yüksek olduğunu göstermektedir. Deneyin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Suda dağılma dayanım deney cihazı

Figure 11. Slake durability test device

Çizelge 5. Suda dayanım deneyi sınıflama tablosu [13]

Table 5. Classification chart for slake durability test [13]

İndeks Değeri (I_{d-1}) (%)	İndeks Değeri (I_{d-2}) (%)	Dağılma Dayanım Sınıflaması
<60	0-30	Çok Düşük
60-85	30-60	Düşük
85-95	60-85	Orta Derecede
95-98	85-95	Orta-Yüksek
98-99	95-98	Yüksek
>99	>98	Çok Yüksek

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

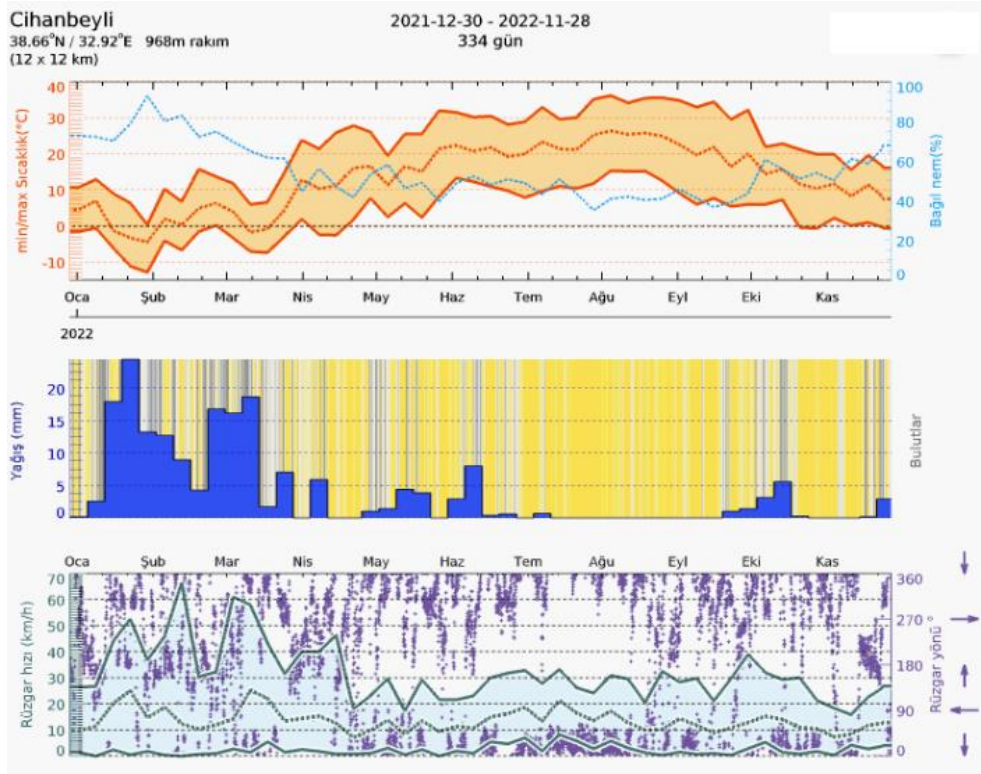
Cihanbeyli-Celil Boğazı Peribacalarını ouşturan kayacın, jeojik tanımının kumtaşı (vake taşı) ya da dismikrit olduğu ince kesit analizi sonucunda anlaşılmıştır. Cihanbeyli-Celil Boğazı Peribacalarını temsil eden ve bölgenin çeşitli yerlerinden alınmış aynı grupta yer alan kumtaşı kaya numuneleri üzerinde bazı fiziko-mekanik testler gerçekleştirilmiş olup, deney sonuçları Çizelge 6'da sunulmaktadır.

Çizelge 6. Celil Boğazı Peribacalarını oluşturan kayaçların bazı mekanik test sonuçları
Table 6. Some mechanical test results of the rocks forming the Celil Gorge Fairy Chimneys

Deneyler	Numune Sayısı	Ortalama Değer ve Standart Sapma
Schmidt Sertliği	5	18,40±0,7
Yoğunluk (gr/cm ³)	5	1,27±0,05
Gözeneklilik (%)	5	43,57±2,12
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	10	8,09±0,89
Nokta Yükleme Dayanımı (MPa)	10	1,16±0,43
Suda Dağılma Dayanımı Değeri (%)	10	1. İndeks değeri: 96,60 2. İndeks değeri: 93,84

Bu çalışmada örnek teşkil eden kayaçlar kumtaşı numuneleri üzerinde yapılan fiziko-mekanik deneyler neticesinde elde edilen veriler incelendiğinde, bölgeyi tasvir edecek nitelikte toplanan kayaçnumtaşı örneklerinin sertlik değerlerinin 18,40 olduğu belirlenmiş olup, “az yumuşak” sınıfta olduğu tanımlanmıştır. ISRM 1981’in önerdiği yöntemlere ISRM’81 standartlarına uygun olarak yapılan yoğunluk ve porozite belirleme deneyleri neticesinde kayaçların kumtaşı örneklerinin düşük yoğunluklu ve yüksek porozite özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı test sonuçlarına göre kayacın kumtaşı örneklerinin ortalama tek eksenli basınç dayanımının 8,09 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre kayaçperi bacasını temsil eden kumtaşı, “düşük dayanımlı” bir kayaç olarak tanımlanmıştır. Nokta yükleme dayanımı test sonuçları incelendiğinde kayaç kumtaşı örneklerinin ortalama nokta yükleme dayanımının 1,16 MPa olduğu saptanmış olup, “düşük dirençli” kayaç olarak tasvir edilmektedir kategorisinde olduğu belirlenmiştir. Bölgeden alınan kayaç kumtaşı örnekleri üzerinde ISRM 1981’in önerdiği yöntemlere ISRM’81 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen suda dağılma dayanımı neticesinde örnek kumtaşı kayaçlarının suda dağılmaya karşı göstermiş olduğu direncin “yüksek” olduğu belirlenmiştir. Cihanbeyli-Celil Boğazı Peribacalarını oluşturan kayaç numuneleri Örnek kayaçlar üzerinde yapılan test sonuçları bütün olarak düşünüldüğünde düşük yoğunluk gösteren, yüksek poroziteli, düşük mekanik özelliklere sahip tipik tuf bir kumtaşı özellikleri taşıyan kayaçlar oldukları belirlenmiştir.

Konya ili, Cihanbeyli ilçesinin 2021 yılını kapsayan meteorolojik verileri göz önüne alındığında, bölgede, yazlar kurak ve sıcak, kışlar soğuk ve sert seyretmektedir. Düşük yoğunluk, yüksek porozite ve düşük dayanım içeren Cihanbeyli-Celil Boğazı peri bacaları daha çok rüzgar, kar ve kuraklık gibi doğal etkenlerden etkilenerek deforme uğramaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. Konya ili, Cihanbeyli ilçesinin 2022 yılını kapsayan meteorolojik verileri [24]
 Figure 12. Meteorological data of Konya province, Cihanbeyli district covering the year 2022 [24]

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Ülkemiz sınırları içerisinde bir çok doğal güzellik mevcuttur. Bu doğal güzelliklerin tanıtımının yapılması, korunması ve nesilden nesile aktarımı oldukça önemli bir konudur. Cihanbeyli sınırları içerisinde bulunan Kuşça bölgesindeki peribacası türündeki jeolojik oluşumlar doğal güzellik yönünden görülmeye değer olup; tanıtıldığı takdirde, bölge turizmi açısından çok yüksek potansiyele sahip bir doğal oluşumdur. Doğal güzelliklerin tanıtımı turizme açılması bölge ekonomisi açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Zira bölge jeolojik miras örneklerinin bir arada bulunduğu özel doğa koruma niteliği taşıyan ender görülen jeolojik oluşumlara sahiptir. Ancak, daha önemlisi ise bu güzelliklerin korunması ve nesillerden nesillere aktarımın sağlanmasıdır. Bu bölgenin jeopark ilan edilmesi, daha çok yeşillendirilmesi, bölgeyi korumak için güvenlik kollarının görevlendirilmesi, bölgeye yakın konumda yaşayan halkın bölgenin önemi hakkında bilgilendirilmesi ve turizme açılması, jeolojik miras olan Cihanbeyli-Celil Boğazı peribacalarının hem korunmasını, hemde tanıtılmasını sağlayacaktır.

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 %25 olarak belirlenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışmada herhangi bir destek bulunmamaktadır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Bu çalışma kullanılabilir veri içermemektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Arık F., Öztürk A., Diken A., 2012, Konya İlindeki Jeolojik Miras Alanlarından Örnekler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, 2012/1, 104.
- [2] Arslan Ş., Diken, A., 2011. "Konya İlindeki Jeolojik Miras Alanlarından Örnekler", 1. Konya Kent Sempozyumu.
- [3] Atalay, İ. (1982). "Türkiye Jeomorfolojisine Giriş", Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Fakültesi Yayınları No.9, İzmir.
- [4] Atlas Coğrafya Ve Keşif Dergisi, 2007. Sayfa 80-88.
- [5] Bieniawski, Z.T., 1975; "The point load test in geotechnical practice", Engineering Geology, 9, M İpp.
- [6] Chaput, E., (1976). Türkiye'de Jeolojik ve Jeomorfolojik Tetkik Seyahatleri, İstanbul Üniversitesi Yayınları No:324, Edebiyat Fakültesi Coğrafya Enstitüsü Yay. No:11, 2. Baskı, İstanbul.
- [7] Dewey, J.F., Pitman, W.C., Ryan, W.B.F., Bonnin, J., 1973. Plate tectonics and evolution of the Alpine system. Geol. Soc. Am. Bull. 84, 3137-3180.
- [8] Doğaner, S., (1995). "Peribacalarının Turizm Bakımından Önemi", Türk Coğrafya Dergisi, Sayı: 30, ss.25-39, İstanbul.
- [9] Dunham, R. J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture : Am. Assoc. Petroleum Geologists Mem. 1, p. 108-121.
- [10] Emre, Ö., Güner, Y., (1988). "Ürgüp Yöresi Peribacalarının Morfojenezi", Jeomorfoloji Dergisi, Sayı: 16, s.23-30, Ankara.
- [11] Erinç, S., (1971). Jeomorfoloji I, Öz Eğitim Yayınları:12, ISBN: 975-8004-21-2, Konya.
- [12] Folk, R. L., 1962, Spectral subdivision of limestone types : Am. Assoc. Petroleum Geologist Mem. 1, p. 62-84.
- [13] Gamble, J. C., 1971, Durability-Plasticity Classification of Shales and Other Argillaceous Rocks, Th. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [14] Gönençgil, Barbaros, and Osman Sarıgül. "Peltier'e göre Türkiye'nin morfojenetik bölgelerinin belirlenmesi." TÜCAUM 30 (2018): 121-137.
- [15] Güney, E. (2010), Yerbilim 1: Jeoloji, Literatür Yayınları:592, İstanbul.
- [16] Güngör, Y., 2008. Celilin peribacaları. T24 Gazetesi.
- [17] Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, G., Pasquare, G., Villari, L., 1982. Anatolia and northwestern Iran. In: Thorpe, R.S. Ed. , Ž . Orogenic Andesites and Related Rocks. Wiley, New York, pp. 327-349.
- [18] ISRM (1978) Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Suggested method for determining indirect tensile strength by Brazilian test. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Z.T. Bieniawski and I. Haweks. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.
- [19] ISRM Commission on the Classification of Rocks and Rock Masses (1981) Basic geotechnical description of rock masses. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abs 18:85-110.
- [20] ISRM, 1985; "Point load test, suggested method for determining point load strength", Int. J. Rock Mec. Min. Sci. Geomech Abstr. 22, 55-60.
- [21] İzbirak, R. (1977). Sistematik Jeomorfoloji, Harita Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- [22] Keller, J., Jung, D., Eckhardt, F.-J., Kreuzer, H., 1992. Radiometric ages and chemical characterization of the Galatean andesite massif Pontus, Turkey. Acta Vulcanol. Marinelli 2, 267-276.
- [23] McKenzie, D., 1972. Active tectonics of the Mediterranean Region. Geophys. J.R. Astron. Soc. 30, 109-185.

- [24] Meteorolojik Arşiv Cihanbeyli - meteoblue, 28 Kasım 2022.
- [25] Pearce, J.A., Bender, J.F., De Long, S.E., Kidd, W.S.F., Low, P.J., Guner, Y., Saroglu, F., Yılmaz, Y., Moorbath, S., Mitchell, J.G., 1990. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 44, 189–229.
- [26] Savaşcin, M.Y., Guleç, N., 1990. Relationship between magmatic and tectonic activities in western Turkey. In: Savaşcin, M.Y., Eronat, A.H. Eds., *Proceedings of IESCA Cong., 2, Yzmir, Turkey*, pp. 300–313.
- [27] Şengör, A.M.C., 1980. Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları. *Geological Society of Turkey*, 40 pp.
- [28] Tokel, S., 1984. Doğu Anadolu'da kabuk deformasyonu mekanizması ve genç volkanitlerin petrojenezi. *Ketin Symposium Proceeding*, pp. 121–130 in Turkish with English abstract.
- [29] Tokel, S., Ercan, T., Akbaşlı, A., Yıldırım, T., Fişekçi, A., Selvi, Y., Ölmez, M., Can, B., 1988. Neogene tholeiitic province of Central Anatolia: Implications for magma genesis and postcollision lithospheric dynamics. *METU Journal of Pure and Applied Sciences* 21, 461–477.
- [30] Yılmaz, Y., 1989. An approach to the origin of young volcanic rocks of western Turkey. In: Şengör, A.M.C. Ed., *Tectonic Evolution of the Tethyan Region*. Kluwer Ac. Pub., pp. 159–189.
- [31] Yılmaz, Y., 1990. Comparison of young volcanic associations of western and eastern Anatolia formed under a compressional regime: a review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 44, 69–87.

SENTIMENT CLASSIFICATION ON TURKISH TWEETS ABOUT COVID-19 USING LSTM NETWORK

^{1*} Mustafa ÇATALTAŞ , ²Büşra ÜSTÜNEL , ³Nurdan AKHAN BAYKAN 

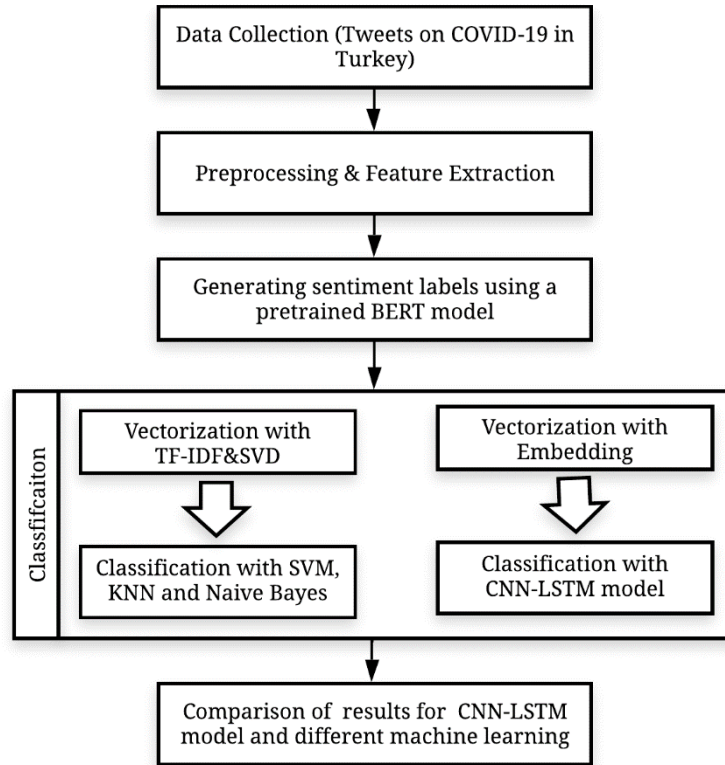
Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Computer Engineering Department,
Campus, Konya, TÜRKİYE

¹mcataltas@ktun.edu.tr, ²f181213042@ktun.edu.tr, ³nbaykan@ktun.edu.tr

Highlights

- Collection of Turkish tweets related to COVID-19 pandemic in Turkey and labelling the collected data according to the sentiment classes to form a dataset using a pre-trained BERT model.
- Training a CNN-LSTM deep neural network model to predict sentiment classes for entries in collected dataset.
- Comparison of CNN-LSTM model and different machine learning algorithms' performance on predicting sentiment classes for entries in collected dataset.

Graphical Abstract





SENTIMENT CLASSIFICATION ON TURKISH TWEETS ABOUT COVID-19 USING LSTM NETWORK

¹Mustafa ÇATALTAŞ , ²Büşra ÜSTÜNEL , ³Nurdan AKHAN BAYKAN 

*Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Computer Engineering Department,
Campus, Konya, TÜRKİYE*

¹mcataltas@ktun.edu.tr, ²f181213042@ktun.edu.tr, ³nbaykan@ktun.edu.tr

(Received: 23.09.2022; Accepted in Revised Form: 17.01.2023)

ABSTRACT: As Covid-19 pandemic affected everyone in various aspects, people have been expressing their opinions on these aspects mostly on social media platforms because of the pandemic. These opinions play a crucial role in understanding the sentiments towards the pandemic. In this study, Turkish tweets on Covid-19 topic were collected from March 2020 to January 2021 and labelled as positive, negative, or neutral in terms of sentiment using BERT which is a pre-trained text classifier model. Using this labelled dataset, a set of experiments were carried out with SVM, Naive Bayes, K-Nearest Neighbors, and CNN-LSTM model machine learning algorithms for binary and multi-class classification tasks. Results of these experiments have shown that CNN-LSTM model outperforms other machine learning algorithms which are used in this study in both binary classification and multi-class classification tasks.

Keywords : Sentiment Analysis, Turkish Twitter, Classification, LSTM

1. INTRODUCTION

Since the start of Covid-19 pandemic, the society has faced different situations in various aspects from economics to daily life activities [1]. It caused people to experience unexpected situations like wearing mask in public or staying inside for long periods of time and so they share their opinions on these situations and experiences in some virtual environments. Nowadays, the opinion-sharing process is mostly happening on social media platforms such as Twitter, Instagram and Facebook. Furthermore, the pandemic has increased social media usage even more since conventional ways of communication between people have been less accessible like office environments, coffee-shops etc. This had led to an expected increase in usage of social media. One of these social media platforms, Twitter, is a platform where users express their opinions mostly in the form of text and within the 280 character per tweet limit and Twitter has become a valuable resource for opinion mining of mass groups of people [2]. Twitter has become quite popular in Turkey in 2020 as well.

Since tweets contains tweet texts, likes, retweets, followers, hashtags, mentions and so on, there is a lot of data in them, and all these types of data could be useful in different contexts. However, to extract valuable information from massive amounts of data Twitter contains, manual techniques may be insufficient. Therefore, different computational techniques should be used for sentiment analysis, topic modelling and clustering using tweet texts, classification of tweets using hashtags and like counts [3].

Sentiment analysis, which deals with sentiments and subjectivity in a text using computational methods, is one of the most popular techniques to extract or identify information from massive data [4]. One of the methods that sentiment analysis is performed is classification using machine learning algorithms. However, machine learning algorithms require labelled data for training. Labeled data refers to data being tagged with labels which identify a property of each instance in the dataset such as sentiment of a tweet.

There are two main types of machine learning algorithms which are unsupervised and supervised. Unsupervised algorithms learn by itself with unlabeled data how the output should be. Whereas supervised algorithms require labelled data for training and uses information learnt from training set to

predict target feature given input features. Regression and classification are two main types of supervised learning. Classification is a supervised task where model is first trained with a train set which consists of data points and labels of these data points [5]. Using training sets, classification algorithms learn to predict labels of new data points. Some supervised machine learning algorithms that are generally used in classification are Support Vector Machines, k-Nearest Neighbors, Decision Trees, Multi-Layer Perceptrons etc.

In this study, Turkish tweets were used to measure Turkish society's opinions to Covid-19 and the preventions using machine learning and deep learning methods. During the pandemic process, it was thought that it could help to understand the psychology of the society according to the positive or negative opinions of people in the country. Moreover, the performances of machine learning and deep learning methods were compared, and most successful model was determined according to the data content.

For this study, sentiments of Turkish Covid-19 tweets in 2020 are analyzed separately by restricting the region to Turkey and language to Turkish. The labels indicate the sentiment of tweets as positive, negative, or neutral. Unfortunately, this information is not available in Twitter, so a pre-trained model named BERT was used to label tweets. The proposed model has utilized a combination of Convolutional Neural Network (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) models to perform sentiment analysis. Classification was also made with k-Nearest Neighbors, Naïve Bayes and Support Vector Machine traditional machine learning algorithms and compared with the results of the CNN-LSTM model.

The organization of this paper is as follows; Section I gives a brief introduction of problem and methodology used in the project. Section II contains selected related works, Section III provides detailed information on methodology used in the project, and Section IV includes experimental setups and results from these experiments. Finally, Section V concludes the problem, methods, results and discusses on possible future work of this project.

2. RELATED WORKS

Opinion mining on social media platforms using machine learning and natural language processing techniques has been quite popular topic since 2010s. In previous works on opinion mining on Twitter, Öztürk *et al.* [6] applied both classification and clustering techniques on tweets which are related to flu and allergy. They used a handful search strategy to label the tweets while collecting data from Twitter. In clustering task, they obtained 3 clusters using K-Means algorithm and when compared to original clusters, they achieved 68% accuracy. In classification task, they achieved 97% accuracy using Random Forest algorithm. In [7], multi-label classification problem for textual data in which every entry in the dataset could have multiple target classes is studied. The method which was proposed to solve this problem combined CNN and LSTM to create a hybrid model. With the proposed model, they achieved 99% accuracy and 81% F1-score on Wikipedia comments dataset which contains Wikipedia comments labelled by their toxicity level.

There has been works before that dealt with sentiment analysis of Covid-19 related tweets in English [8-10]. In [9], sentiment analysis on English Covid-19 dataset collected from Twitter from January 2020 to July 2020 is performed by utilizing a logistic regression classifier which is fed with collected tweet texts. Their main goal was to analyze sentiment change of the society through different stages of the pandemic.

There has also been an ongoing effort for sentiment analysis on Turkish social media. In previous works in this area [11-15], various traditional machine learning algorithms were utilized for sentiment classification of microblogging entries in earlier works [11]. In recent years, with the rapid enhancement of deep learning model, sophisticated models like LSTMs, RNNs and Transformers has been deployed for this task [15]. In [12], a comparison of machine learning models and pretrained language models on sentiment analysis task was given. The results showed that pretrained language model scored 98.7% accuracy, while the most successful machine learning model scored 98.4% accuracy.

In [13], to perform sentiment analysis on English Twitter-Covid-19 dataset, an LSTM model was utilized with tweets labelled with sentiments obtained by a pre-trained model. The results of the LSTM model were compared to traditional machine learning models. From these comparisons, it was seen that the LSTM model perform much better than traditional machine learning algorithms. LSTM model gave 0.75 F1-score, while Support Vector Machine, the best performing traditional machine learning algorithm in the study, gave 0.60 F1-score.

3. METHODOLOGY

An overall flow of the methods used in this study is given in Figure 1. Detailed explanations of these methods are given in below subsections.

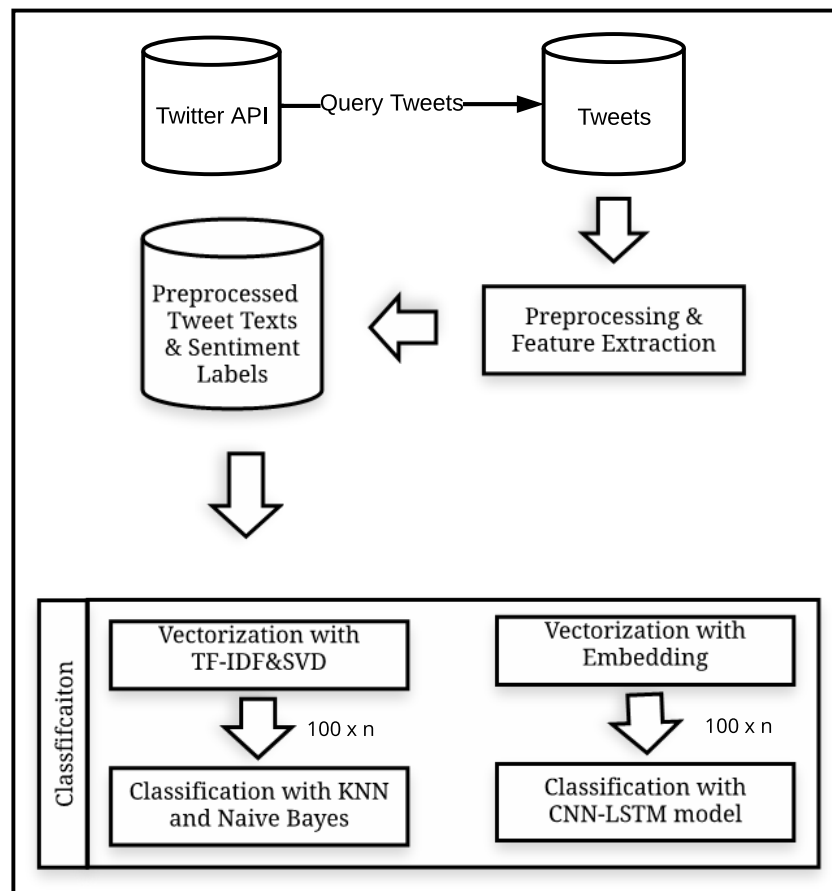


Figure 1. An overview of proposed methods.

3.1. Dataset

To be able to satisfy the data needs, tweets were retrieved from Twitter API. Using the utilities of Twitter API, tweets from March 2020 to January 2021 which contain “Türkiye”, and “Corona” terms were retrieved. At the end of this process, 55K tweets on Covid-19 topic were collected.

Since labelled data is required for classification task, the collected data needs to be labelled where labels indicate the sentiment class of each tweet. To achieve this, a pre-trained model BERT (Bidirectional

Encoder Representations from Transformers) on Turkish Sentiment Datasets was used [16]. In Table 1, example tweets are given for each sentiment class from the dataset.

Table 1. Example tweets, their preprocessed versions, and sentiments classes for collected dataset.

Example Tweet	Preprocessed Tweet	Sentiment Class
Corona Türkiye'de yokken gelmeyecek gibi hissediyorduk şimdi gitmeyecek gibi hissediyoruz	corona turkiyede yokken gelmeyecek hissediyorduk şimdi gitmeyecek hissediyoruz	Negative
31 Mart - Türkiye için corona vaka sayısı açıklandı!	31 mart turkiye corona vaka sayisi aciklandı	Neutral
Bence şu olay biterse Türkiye anlaşıp aynı anda sokaklara inip koşalım, düşünsenize deli gibi koşan insanlar bence muhteşem #corona #EvdeKalTürkiye #COVID19	bence su olay biterse türkiye anlasip ayni anda sokaklara inip kosalım düşünsenize deli kosan insanlar bence muhtesem	Positive

As can be seen from Table 2, the dataset contains mostly negative tweets which are expected because of the topics of these tweets. When the data distributions are examined, it is seen that there is an unbalanced data in terms of the classes. For classification, this may affect the outcome success of experimental studies. For this reason, the results are given not only by accuracy, but also by precision and recall values, and by the confusion matrices. Thus, the classification successes of each class are shown according to classifiers.

Table 2. Distribution of data for each sentiment class

Sentiment Class	Tweet Count
Positive	12534
Negative	38910
Neutral	4072

3.2. Preprocessing

Preprocessing steps were applied to text for normalization. These steps include removal of duplicate tweets, non-alphanumerical character including emojis, punctuations, equalizing the number of documents in sarcastic and non-sarcastic classes.

To improve the results in classification, tweets in the dataset were subjected to several preprocessing steps before text vectorization. At first, duplicate tweets were removed, and all tweets were converted to lowercase so that there will not be any ambiguity. Then, tweets were cleaned from any unwanted character in the text by removing URLs, any non-alphanumerical character including emojis, punctuations. After these steps, documents that are shorter than 5 token were removed from the dataset just as duplicate documents. In Figure 2, these steps are shown.

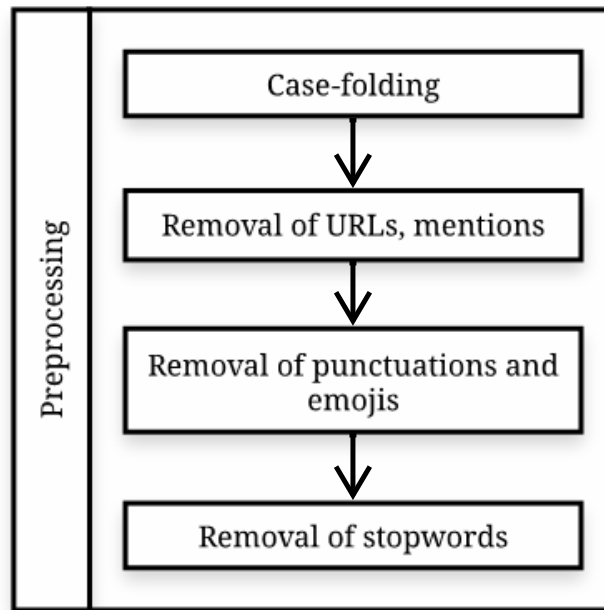


Figure 2. Preprocessing steps of study

3.3. Feature Extraction

To extract features from text, the methods used are TF-IDF [17] which creates a vector for each document in the dataset. TF-IDF is a scoring system for determining the relative importance of a word to the entire document in a corpus [17]. It utilizes two terms: Terms Frequency (TF) which represents number of occurrences of a word in a document and Inverse Document Frequency (IDF) which represents the ratio of total number of documents that contains the term. Equations (1)-(3) show the detailed calculation steps of TF-IDF.

$$tfidf(t, d, D) = tf(t, d) \times idf(t, D) \quad (1)$$

$$tf(t, d) = 1 + \log f(t, d) \quad (2)$$

$$idf(t, D) = \log\left(\frac{N}{n(t)}\right) \quad (3)$$

In here, tf is term frequency, idf is inverse document frequency d representing current document and t representing current term. Equation 3 shows how inverse document frequency is calculated, with N being number of documents in the dataset and $n(t)$ representing the number of documents which contain term t .

As shown in [18], dimension reduction to TF-IDF can be achieved using Singular Value Decomposition (SVD) which is a dimensionality reduction method that works well with sparse matrices. Equation 4 shows how SVD is calculated. In this equation, TF-IDF matrix which is represented by C is decomposed into factorization of three matrices. For a C matrix with the dimension $m \times n$, these matrices are U , Σ and V . U is an $n \times n$ unitary matrix whose columns are the orthogonal eigenvectors of CC^T , Σ is a

$m \times n$ diagonal matrix with singular values of C and V is an $n \times n$ unitary matrix whose columns are the orthogonal eigenvectors of $C^T C$.

$$C = U \Sigma V^T \quad (4)$$

Truncated Singular Value Decomposition is based on SVD which is also called Latent Semantic Analysis (LSA) in information retrieval [19]. Truncated SVD makes it possible to restrict the *number* of features in the training set by applying low-rank approximation to TF-IDF matrix. In Equation 5, k represents the number of features. In truncated SVD, only highest k singular values are kept in Σ , others are set to 0. When C_k is computed, all rows are comprised of 0s except first k rows as shown in Equation 5.

$$C_k = U \Sigma_k V^T \quad (5)$$

For LSTM model, input text is first tokenized by splitting the input text by spaces. In the result of tokenization, *since* number of tokens in different input texts differs, a different sequence length is seen in resulting feature set. To make all of them have the same length, sequences are padded until they reach the length of 100. Therefore, final sequence lengths for all sequences have become 100.

3.4. Classification

3.4.1. Traditional Machine Learning Algorithms

Text vectors generated in previous phase are first fed into traditional machine learning models which are Support Vector Machine (SVM), k-Nearest Neighbors (k-NN) and Naïve Bayes (NB). k-NN is one of earliest and *simplest* machine learning algorithms [20]. Despite this, it is an effective baseline method for classification task. The algorithm of k-NN is quite simple. To assign a class to a given data point, it calculates determined distance between the data point and all other points in dataset and finds closest k data points. Dominant class with these k points' classes is selected as the class of the given data point. The number of neighbors indicated by parameter (k) is selected as 10 and Euclidean distance was used as distance function for this study. Naïve Bayes (NB) is one of the basic probabilistic models that is utilized in text classification, especially with binary text classification [21]. Naïve Bayes uses conditional probability to calculate most probable target class in classification tasks. Support Vector Machines are known as powerful method for finding decision boundaries between classes which is also called hyperplanes [22]. Although SVM was originally designed to have a linear classifier, it can be used in higher dimensional problems by using SVM with kernel functions such as sigmoid kernel function or hyperbolic tangent kernel function.

3.4.2. CNN-LSTM Model

In the processing of variable-length sequences, the Recurrent Neural Network (RNN) has been widely used [23]. However, because most RNNs are multi-layer feed-forward neural networks, a huge amount of historical data provided by long sequences will result in vanishing gradient and information loss. Long Short-Term Memory (LSTM) [23] is an enhanced version of RNN where information loss and vanishing gradient problems are resolved by adding memory cell state and three control gates to RNN design. "Cell State" can be explained as a communication line and network memory that carries meaningful information across cells to make predictions. In this way, the short-term memory problem is solved, and old data can be moved along the network chain. The information that the Cell State must carry throughout this journey is determined through the gates. These gates can determine what information is necessary or unnecessary which is decided using a sigmoid function.

Convolutional neural networks (CNN) are a type of artificial neural network (ANN) that is used to evaluate visual data [24]. CNNs are based on a shared-weight architecture of convolution kernels or filters that slide along input features to produce translation-equivariant outputs called feature maps. They're employed in a variety of applications, including image and video recognition, recommender systems. As

stated in [25], adding convolution layers before LSTM layer could be beneficial. Therefore, we end up with model that utilizes convolution layer before LSTM layer. A representation of the model used in this study can be seen in Figure 3 and parameters of the model are given in Table 3.

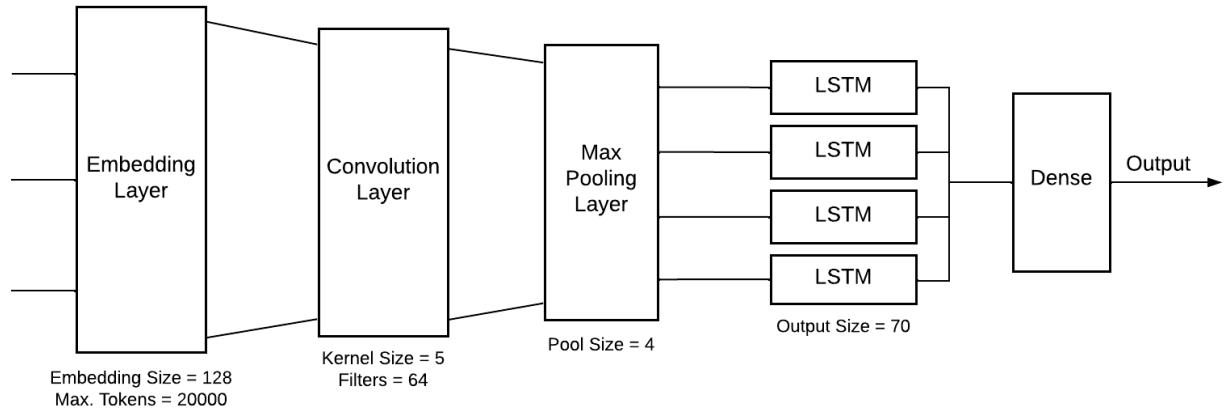


Figure 3. CNN-LSTM network architecture

Table 3. Parameters of CNN-LSTM model

Parameter	Value
Optimizer	Adam
Learning rate	0.001
Loss Function	Categorical Cross Entropy
Dropout	0.25
Batch Size	30
Number of Epochs	2

4. EXPERIMENTS AND RESULTS

4.1. Experimental Setup

All experiments in this study were conducted in Google Colaboratory which provides its users with Tesla K80 GPU and support Python programming language. For deep learning and machine learning part of the study, Scikit-learn [26], TensorFlow [27] and Keras [28] libraries were used. For experiments to be repeatable, random state for all random operations was selected as 42. For all experiments, randomly selected 25% of the dataset was reserved as test set and remaining data in the dataset was used for training which is 75% of the whole dataset. Since the dataset contains sufficient data for classification algorithms, cross-validation techniques were not applied.

The experimental setup includes two different classification tasks, a binary classification task where tweets are classified as positive or negative and a multi-class classification task where tweets are classified as neutral, positive, or negative. The reason for this, as can be seen from Table 1, neutral class contains much less data than other classes which causes imbalance in the dataset. To eliminate this issue, tweets which are labeled as neutral were discarded for binary classification task.

For traditional machine learning algorithms, tweet texts were vectorized through two different ways which TF-IDF with 2000 maximum features limitation and TF-IDF + SVD with 100 maximum features limitation. For CNN-LSTM model, padded sequences were used to vectorize tweet texts with parameters

maximum features as 20000 and sequence length as 100 tokens. These parameters are used for both 2-class and 3-class classification tasks. While in Table 4, scores for 3-class classification are given, Table 5 gives 2-class scores.

4.2. Metrics

Metrics used to evaluate result of classification task in this study are accuracy, precision, recall and F1-score [29]. These parameters are calculated using confusion matrices. Confusion matrices are also used to evaluate the results of machine learning algorithms. Creation of confusion matrix for binary classification is given in Figure 4 and same logic can be applied to confusion matrices for multi-class classification.

		Predicted Class	
		1	0
True Class	1	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	0	False Positive (FP)	True Negative (TN)

Figure 4. Confusion matrix for binary classification

The accuracy gives a baseline for comparing the rate at which classifications are correct. From the data, it can be observed that the deep methods perform best. The equation used to calculate accuracy is given in (4).

$$Accuracy = \frac{Correct\ prediction}{total\ number\ of\ predictions} \tag{4}$$

The other metric is F1-score which considers the precision and recall of classifiers and gives a better sense of the classification performance [29]. The F1-score equation is given in (5).

$$F1 - score = 2 \times \frac{1}{\frac{1}{precision} + \frac{1}{recall}} \tag{5}$$

Recall and precision are other classification metrics that constitutes F1-score [29]. Their equations are given in (6) and (7) respectively.

$$Recall = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ negative} \tag{6}$$

$$Precision = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive} \tag{7}$$

4.3. Classification Results

As can be seen from Table 4 and Table 5, TF-IDF alone and TF-IDF with SVD methods performed similar results for most of the cases, however the feature vector length is much higher when TF-IDF used alone. This increases the computation of TF-IDF and thus TF-IDF with SVD becomes more suitable for computation time.

The difference in results of classification models for 2-class and 3-class classification tasks can be seen from Table 4 and Table 5. Classification model performs better in 2-class classification task, which is

expected since the probability of guessing the correct label. Furthermore, the eliminated class -neutral- constitutes a small portion of the dataset which results in affecting the classification models adversely.

One observation that is depicted from confusion matrices in Figure 5 and Figure 6 is that SVM can guess wrong labels if the sample is not from the dominant class. Another observation is CNN-LSTM model used in this study outperform traditional machine learning algorithms in both scenarios.

Table 4. Results for 3-class classification (negative-neutral-positive)

Classifier	Vectorizer	Accuracy	Precision*	Recall*	F1-score*
k-NN	TF-IDF	0.74	0.71	0.74	0.71
k-NN	TF-IDF + SVD	0.74	0.71	0.74	0.71
Naive Bayes	TF-IDF	0.46	0.63	0.46	0.48
Naive Bayes	TF-IDF + SVD	0.46	0.64	0.46	0.48
SVM (linear kernel)	TF-IDF	0.73	0.65	0.73	0.65
SVM (linear kernel)	TF-IDF + SVD	0.72	0.65	0.72	0.64
LSTM-CNN model	Padded Sequences	0.76	0.82	0.77	0.77

*Weighted averages were used when overall precision, recall and F1-score.

Table 5. Results for 2-class classification (negative-positive)

Classifier	Vectorizer	Accuracy	Precision*	Recall*	F1-score*
k-NN	TF-IDF	0.79	0.77	0.79	0.77
k-NN	TF-IDF + SVD	0.79	0.77	0.79	0.77
Naive Bayes	TF-IDF	0.54	0.72	0.54	0.56
Naive Bayes	TF-IDF + SVD	0.54	0.72	0.54	0.57
SVM (linear kernel)	TF-IDF	0.77	0.77	0.77	0.71
SVM (linear kernel)	TF-IDF + SVD	0.77	0.77	0.77	0.71
LSTM-CNN model	Padded Sequences	0.84	0.84	0.84	0.84

*Weighted averages were used when overall precision, recall and F1-score.

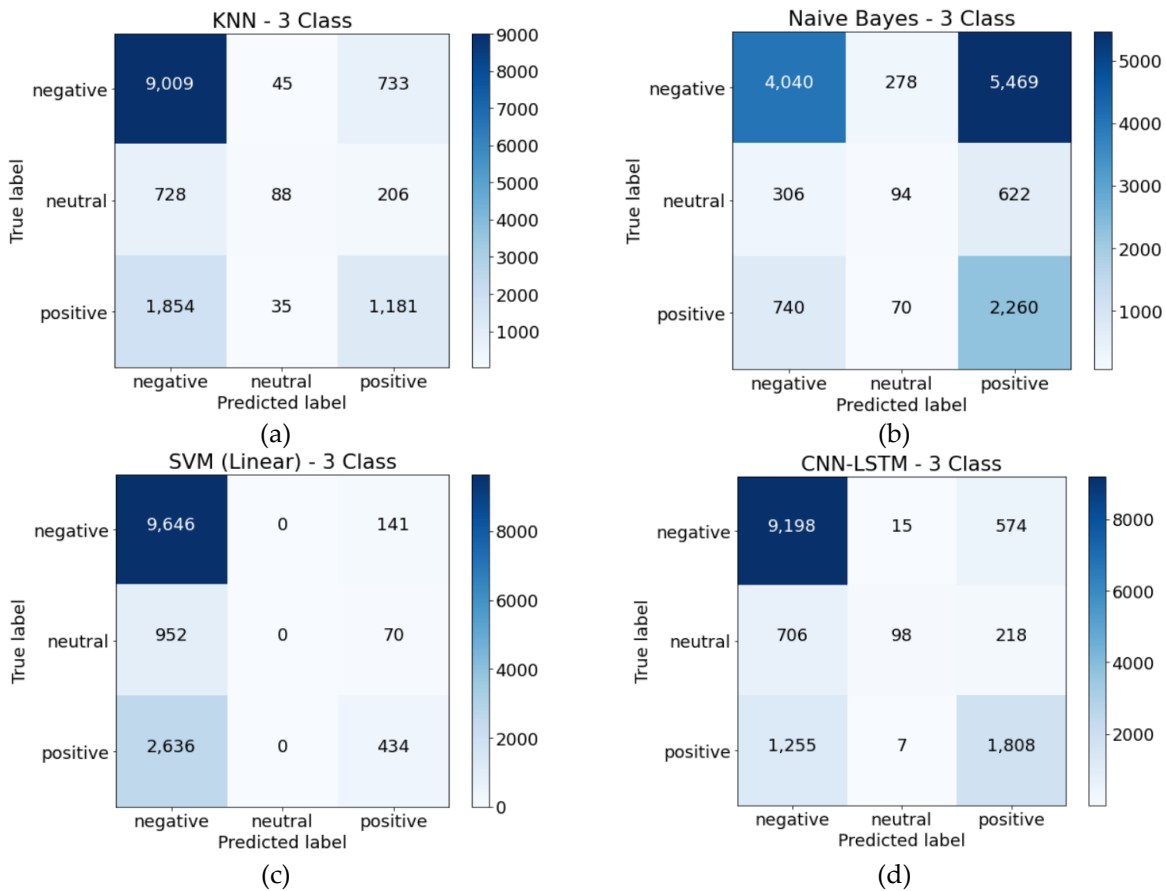


Figure 5. Confusion matrices for 3-class classification results of (a) k-NN, (b) Naïve Bayes, (c) SVM trained with vectors created by TF-IDF + SVD and (d) CNN-LSTM model trained with vectors created by padded sequences.

5. CONCLUSION

Sentiment analysis has become a significant field of research in information retrieval in the field of NLP. Sentiment analysis techniques aim to extract or identify subjective information from textual data with rule-based or machine learning techniques. In recent years, the increase in the popularity of this field comes from advancements in deep learning field which includes more powerful architectures and pre-trained language models.

Turkish is an agglutinative language, so it is difficult and different from English. Turkish has some challenges to make sentiment analysis due to its structural difficulties and therefore there are a limited number of Turkish language studies in the literature. In this study, it was aimed to classify Turkish Twitter posts according to their sentiments analysis and to contribute to the literature.

For the study, a Turkish Twitter dataset on Covid-19 which is retrieved from Twitter API and labelled by a pre-trained BERT model was used. After preprocessing applied to collected tweets, they were vectorized through TF-IDF, TF-IDF with SVD and padded sequences. Then k-NN, NB and SVM traditional machine learning (ML) algorithms and CNN-LSTM network were applied for sentiment analysis for binary and multi-class classification tasks. The results show that there is no significant difference between ML algorithms for both classifications, binary and multi-class. Even the most successful model -kNN- had classification accuracy as 0.74 in the 3-class and 0.79 in the 2-class, while the CNN-LSTM model had accuracy as 0.76 and 0.85 in the 3-class and 2-class classification, respectively. The results of experiments

conducted have shown that CNN-LSTM model performs better at both classification tasks. The performance comparison of methods can be helped to new future similar studies on Turkish Tweets.

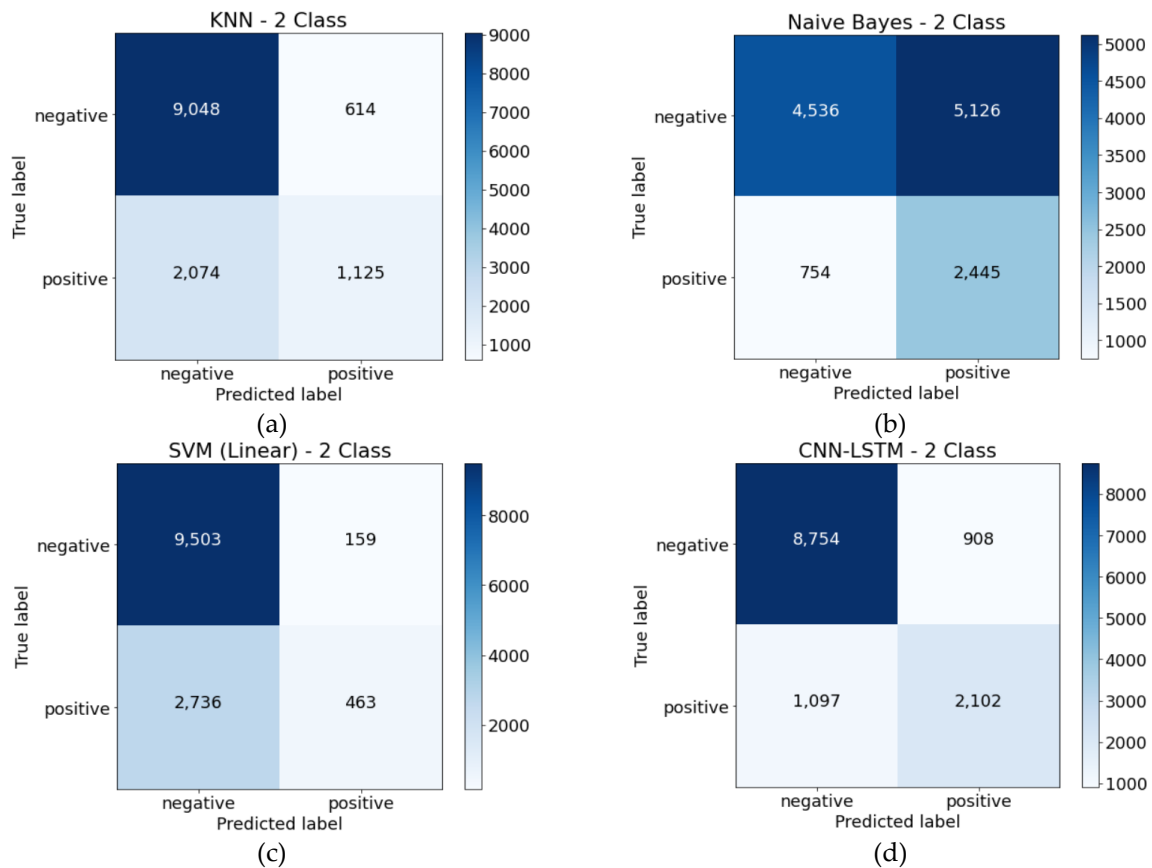


Figure 6. Confusion matrices for 2-class classification results of (a) k-NN, (b) Naïve Bayes, (c) SVM trained with vectors created by TF-IDF + SVD and (d) CNN-LSTM model trained with vectors created by padded sequences.

Declaration of Ethical Standards

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

Credit Authorship Contribution Statement

Mustafa Çataltaş: Experiments, writing and editing. **Büşra Üstünel:** Data collection, software, and experiments. **Nurdan Akhan Baykan:** Writing, reviewing, supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors declared that they have no conflict of interest.

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

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

REFERENCES

- [1] H. Abid, J. Mohd, and V. Raju, "Effects of COVID 19 pandemic in daily life," *Current Medicine Research and Practice*, vol. 10, no. 2, pp. 78-79, 2020.
- [2] B. Gokulakrishnan, P. Priyanthan, T. Ragavan, N. Prasath, and A. Perera, "Opinion mining and sentiment analysis on a twitter data stream," in *International conference on advances in ICT for emerging regions (ICTer2012)*, 2012: IEEE, pp. 182-188.
- [3] B. Özyurt and M. A. Akçayol, "Fikir Madenciliği ve Duygu Analizi, Yaklaşımlar, Yöntemler Üzerine Bir Araştırma," *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 6, no. 4, pp. 668-693, 2018.
- [4] W. Medhat, A. Hassan, and H. Korashy, "Sentiment analysis algorithms and applications: A survey," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 1093-1113, 2014.
- [5] A. Singh, N. Thakur, and A. Sharma, "A review of supervised machine learning algorithms," in *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 2016: IEEE, pp. 1310-1315.
- [6] A. Öztürk, Ü. Durak, and F. Badilli, "Twitter Verilerinden Doğal Dil İşleme Ve Makine Öğrenmesi İle Hastalık Tespiti," *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 4, pp. 839-852, 2020.
- [7] H. Çetiner, "Multi-Label Text Analysis With A CNN And LSTM Based Hybrid Deep Learning Model," *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9, no. 17, pp. 15-16, 2022.
- [8] A. H. Alamoodi et al., "Sentiment analysis and its applications in fighting COVID-19 and infectious diseases: A systematic review," *Expert systems with applications*, vol. 167, p. 114155, 2021.
- [9] C. R. Machuca, C. Gallardo, and R. M. Toasa, "Twitter sentiment analysis on coronavirus: Machine learning approach," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1828, no. 1: IOP Publishing, p. 012104.
- [10] L. Nemes and A. Kiss, "Social media sentiment analysis based on COVID-19," *Journal of Information and Telecommunication*, vol. 5, no. 1, pp. 1-15, 2021.
- [11] Ö. Çoban, B. Özyer, and G. T. Özyer, "Sentiment analysis for Turkish Twitter feeds," in *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2015: IEEE, pp. 2388-2391.
- [12] Z. A. Guven, "Comparison of BERT models and machine learning methods for sentiment analysis on Turkish tweets," in *2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, 2021: IEEE, pp. 98-101.
- [13] Y. E. Karaca and S. Aslan, "Sentiment Analysis of Covid-19 Tweets by using LSTM Learning Model," *Computer Science*, no. Special, pp. 366-374, 2021.
- [14] N. Öztürk and S. Ayvaz, "Sentiment analysis on Twitter: A text mining approach to the Syrian refugee crisis," *Telematics and Informatics*, vol. 35, no. 1, pp. 136-147, 2018.
- [15] H. A. Shehu et al., "Deep sentiment analysis: a case study on stemmed Turkish twitter data," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 56836-56854, 2021.
- [16] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, "BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding," *CoRR*, vol. abs/1810.04805, 2018.
- [17] J. Ramos, "Using tf-idf to determine word relevance in document queries," in *Proceedings of the first instructional conference on machine learning*, 2003, vol. 242, no. 1: Citeseer, pp. 29-48.
- [18] A. I. Kadhim, Y.-N. Cheah, I. A. Hieder, and R. A. Ali, "Improving TF-IDF with singular value decomposition (SVD) for feature extraction on Twitter," in *3rd international engineering conference on developments in civil and computer engineering applications*, 2017.

- [19] D. M. Christopher, R. Prabhakar, and S. Hinrich, "Introduction to information retrieval," ed: Cambridge University Press, 2008.
- [20] T. Cover and P. Hart, "Nearest neighbor pattern classification," *IEEE transactions on information theory*, vol. 13, no. 1, pp. 21-27, 1967.
- [21] L. I. Kuncheva, "On the optimality of Naïve Bayes with dependent binary features," *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 7, pp. 830-837, 2006.
- [22] V. Vapnik, "Pattern recognition using generalized portrait method," *Automation and remote control*, vol. 24, pp. 774-780, 1963.
- [23] A. Sherstinsky, "Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 404, p. 132306, 2020.
- [24] M. V. Valueva, N. Nagornov, P. A. Lyakhov, G. V. Valuev, and N. I. Chervyakov, "Application of the residue number system to reduce hardware costs of the convolutional neural network implementation," *Mathematics and computers in simulation*, vol. 177, pp. 232-243, 2020.
- [25] T. N. Sainath, O. Vinyals, A. Senior, and H. Sak, "Convolutional, long short-term memory, fully connected deep neural networks," in *2015 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, 2015: IEEE, pp. 4580-4584.
- [26] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine learning in Python," *the Journal of machine Learning research*, vol. 12, pp. 2825-2830, 2011.
- [27] M. Abadi et al., "Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems," *arXiv preprint arXiv:1603.04467*, 2016.
- [28] F. Chollet, "keras," ed, 2015.
- [29] D. M. Powers, "Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation," *arXiv preprint arXiv:2010.16061*, 2020.



COVID-19 DETECTION USING VARIATIONAL MODE DECOMPOSITION OF COUGH SOUNDS

*Fatma Zehra SOLAK 

*Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Software engineering Department,
Konya, TÜRKİYE
fzgogus@ktun.edu.tr*

Highlights

- The diagnosis of COVID-19 was performed by distinguishing the cough sounds of COVID-19 positive people from those of COVID-19 negative ones.
- The study was carried out on the “Virufy” open access cough sound dataset.
- Variational Mode Decomposition (VMD) method produced new features for the discrimination of cough sounds.
- Data balancing performed with the oversampling technique has significantly increased the performance.
- Ensemble machine learning methods showed high performances to identify cough sounds as COVID-19 and Non-COVID-19 through classification.



COVID-19 DETECTION USING VARIATIONAL MODE DECOMPOSITION OF COUGH SOUNDS

Fatma Zehra SOLAK

*Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Software engineering Department,
Konya, TÜRKİYE
fzgogus@ktun.edu.tr*

(Geliş/Received: 28.04.2022 ; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.01.2023)

ABSTRACT: According to the World Health Organization, cough is one of the most prominent symptoms of the COVID-19 disease declared as a global pandemic. The symptom is seen in 68% to 83% of people with COVID-19 who come to the clinic for medical examination. Therefore, during the pandemic, cough plays an important role in diagnosing of COVID-19 and distinguishing patients from healthy individuals. This study aims to distinguish the cough sounds of COVID-19 positive people from those of COVID-19 negative, thus providing automatic detection and support for the diagnosis of COVID-19. For this aim, "Virufy" dataset containing cough sounds labeled as COVID-19 and Non COVID-19 was included. After using the ADASYN technique to balance the data, independent modes were obtained for each sound by utilizing the Variational Mode Decomposition (VMD) method and various features were extracted from every mode. Afterward, the most effective features were selected by ReliefF algorithm. Following, ensemble machine learning methods, namely Random Forest, Gradient Boosting Machine and Adaboost were prepared to identify cough sounds as COVID-19 and Non COVID-19 through classification. As a result, the best performance was obtained with the Gradient Boosting Machine as 94.19% accuracy, 87.67% sensitivity, 100% specificity, 100% precision, 93.43% F-score, 0.88 kappa and 93.87% area under the ROC curve.

Keywords: ADASYN, Cough Sound, COVID-19, Ensemble Machine Learning, ReliefF, Variational Mode Decomposition (VMD)

1. INTRODUCTION

The coronavirus disease called as COVID-19 emerged in Wuhan, China, in December 2019. It triggers what doctors call a respiratory infection and it is declared a global pandemic in 2020 by the World Health Organization (WHO) [1, 2]. There have been 622.389.418 confirmed cases of COVID-19, including 6.548.492 deaths, reported to WHO (as of October 18, 2022). COVID-19 is spreading rapidly and related deaths are increasing day by day. Therefore, early diagnosis of this disease is very important in terms of taking early precautions, reducing deaths and better management of a pandemic.

The WHO states that coughing, high fever, fatigue, headache, muscle, sore throat and shortness of breath are common symptoms of COVID-19 [3, 4]. Cough is the predominant of them since it is one of the early symptoms of respiratory tract infections. Also it occurs in 68% to 83% of people with COVID-19 who come for a medical examination [2, 3]. Therefore, automatic detection of COVID-19 from coughing by using cough sound signals and machine learning has recently been one of the popular and important fields of study for early diagnosis.

When the literature studies were evaluated in terms of early diagnosis of patients with and without COVID-19, it was seen that some researchers classified only a single cough sound signal with different machine learning methods. Bagad, et al. [5] benefited from cough sounds and CNN-based framework to find COVID-19. They obtained area under of ROC curve (AUC) of 72%. Chaudhari, et al. [6] detected COVID-19 and Non COVID-19 with AUC of 77.1% using cough sounds and Ensemble Deep Learning Model. Imran, et al. [7] distinguished COVID-19 coughs and several types of Non COVID-19 coughs through classical machine learning and deep learning methods. Accuracy of 92.85% was accessed in the

*Corresponding Author: Fatma Zehra SOLAK, fzgogus@ktun.edu.tr

study. Fakhry, et al. [8] utilized cough sounds and Multi-Branch Deep Learning Network for diagnosis of COVID-19. Researchers acquired average AUC of 91.0%. Melek Manshoury [9] defined the coughs of subjects with COVID-19 and Non COVID-19 using Support Vector Machine method. As a result of their study, accuracy of 95.86% was reached. Pahar, et al. [2] discriminated coughs of patients with COVID-19 from both COVID-19 negative and healthy coughs by means of different machine learning classifiers. 98% and 94% AUC values were obtained with Resnet50 and LSTM respectively. Kamble, et al. [10] developed several systems using cough sounds and machine learning methods. Their best system obtained AUC of 76.31% employing light gradient boosting machine (LightGBM) backend. Rao, et al. [11] developed a model using VGG13 deep learning architecture for detection of COVID-19 cough sound. Their model achieved an average AUC of 78.3%. Erdoğan and Narin [12] detected COVID-19 patients from cough data. The highest accuracy in the study was found to be 98.4%. Tena, et al. [13] diagnosed COVID-19 with accuracy of 90% using cough sounds and supervised machine-learning algorithm. Islam, et al. [14] used cough sounds and a deep neural network. Thus, they developed an algorithm for automated diagnosis of COVID-19. The researchers automatically detected COVID-19 cough sounds with accuracies of 89.2%, 97.5%, and 93.8% using different feature vectors. In addition to these studies, some researchers classified different biological signals such as breathing and speech sounds along with cough sounds for the same purpose. Aly, et al. [15] studied the diagnosis of COVID-19 using cough, breathing and speech sounds together with Deep Model and Shallow classifiers. Average AUC of 96.4% performance was obtained in their study. Coppock, et al. [16] studied with cough and breathing sounds. They used ResNet and accessed AUC of 84.6%. Khriji, et al. [17] recognized positive COVID-19 cases via a deep learning technique-based COVID-19 cough and breathe analysis. In their study, Deep LSTM framework achieved up to accuracy of 80%. Grant, et al. [18] used crowd-sourced database consisted of cough, speech and breath sounds of COVID-19 and Non COVID-19 subjects. Random forests (RF) and deep neural networks (DNN) classifiers were utilized and AUC of 68.36% for cough sounds was obtained. Lella and Pja [19] preferred to classify voice, dry cough, and breath sounds with multi-channelled Deep Convolutional Neural Network. They obtained accuracy of 95.45% for the detection of COVID-19 disease from these sounds.

As a result of all literature studies, it has been concluded that cough sound are of great importance in the diagnosis of COVID-19 and in most cases, it achieves high success even when used alone. Based on this inference, the aim of this study was established and the automatic detection of COVID-19 was carried out for early diagnosis. For this aim signal processing method, appropriate machine learning methods and “GitHub” open source cough dataset “Virufy” were used. In this study, diagnosis is based on distinguishing of COVID-19 and Non COVID-19 cough sounds by classification.

It has been a difficult task to determine features that will enable characterize the signals. Researchers in literature have often used mel frequency cepstral coefficients (MFCC), mel spectrogram, short time fourier transform (STFT) signal processing methods and similar features such as log frame energies, zero crossing rate (ZCR), skewness, kurtosis to extract characteristic features from sound signals. Within the scope of this study, unlike the previous ones, Variational Mode Decomposition (VMD) method has been used to search new features used in distinguishing COVID-19 coughs from those of Non COVID-19. VMD is a new modal decomposition method proposed in recent years and can effectively solve the shortcomings of the conventional Empirical Mode Decomposition (EMD) such as sensitive to noise and mathematical expression. VMD decomposes signal into a number of sub-signals in other words independent modes [20]. Since VMD independent modes can capture the distinctive features of signals at different frequencies, the features extracted from these modes will be effective for the analysis and discrimination of cough sounds and therefore for the diagnosis of COVID-19 disease [21]. For this reason, in this study, after the data augmentation process with ADASYN technique, cough sound signals have been decomposed into independent modes by 5-layer VMD method and features have been extracted from each mode. Then, the most effective features have been determined through ReliefF feature selection algorithm [22]. By using these features with different ensemble machine learning methods, namely Random Forest (RF), Adaboost and Gradient Boosting Machine (GBM), the cough

sounds of COVID-19 patients were separated from those of Non COVID-19. The findings of the study indicate that COVID-19 cough sound signals can be identified with acceptable classification accuracy and AUC.

As a result of the study, it was concluded that automatic detection of COVID-19 from cough sounds were achieved with high success thanks to data augmentation, VMD-based features and ensemble machine learning methods. Thus, early diagnosis of COVID-19 can be possible.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Dataset

Virufy COVID-19 open-access Cough Dataset [6] available on “GitHub” was used in this study. Collection of the cough sound data from subjects were carried out in a hospital under supervision by physicians, following standard operating procedures (SOPs) and informed patient consent. Cough sounds were recorded from 16 subjects using the smartphone app upon the request of Stanford University as seen in Figure 1 [6]. Some of the subjects have various symptoms such as fever chills etc., while others have no symptoms. These subjects were labeled as COVID-19 and Non COVID-19 according to PCR test status. Information about the subjects is shown in Table 1 [9].

Cough sounds records of the patients are in mp3 format with a 48000 Hz of sampling rate in a single channel (mono). After the preprocessing steps were carefully done on the cough sounds, dataset consisted of these coughs is available on “GitHub”. Also, in the dataset, there are 121 cough sound segments resulting from the segmentation of these sounds. 73 of the segments are Non COVID-19 and 48 are COVID-19. Following the segmentation process, the each subject’s cough time was 1640 ms (ms). The segmentation step makes a major contribution to the analysis by emphasizing the significance and dominance of infected regions [23]. Therefore, segmented forms of cough sounds were used in this study.



Figure 1. Recording of cough sounds [6]

Table 1. Information of 16 subjects

Patient No	Age	Gender	Any chronic illness	Complaints and symptoms	PCR result
1	53	M	None	None	N
2	50	M	Congestive heart failure	Shortness of breath	P
3	43	M	None	Sore throat	N
4	65	M	Asthma or lung disease	Shortness of breath, worsening cough	P
5	40	F	None	Sore throat, Loss of taste, Loss of smell	P
6	66	F	Diabetes	None	N
7	20	F	None	None	N
8	17	F	None	Shortness of breath, Sore throat, Body aches	N
9	47	M	None	Worsening cough	N
10	53	M	None	Fever, chills, or sweating, Shortness of breath, worsening cough, Sore throat, Loss of taste, Loss of smell	P
11	24	F	None	None	P
12	51	M	Diabetes	Fever, chills, or sweating, worsening cough, Sore throat	P
13	53	M	None	None	N
14	31	M	None	Shortness of breath, worsening cough	P
15	37	M	None	None	N
16	24	F	None	Worsening cough	N

*M: Male, F: Female, N: Negative, P: Positive

2.2 Pre-processing

COVID-19 positive and negative cough sounds in the Virufy dataset are unbalanced (73 Non COVID-19 and 48 COVID-19). The number of positive labeled coughs is very small and this insufficiency may result in failed COVID-19 and Non COVID-19 classification results. To effectively identify COVID-19 coughs, in the pre-processing step, the ADASYN [24] oversampling technique is applied to sound signals. The ADASYN technique is derived from Synthetic Minority Over Sampling Technique (SMOTE). The SMOTE technique creates synthetic samples based on the location of the data. Firstly, it randomly selects a point belong to minority class, then search the k nearest neighbors of the same class [25]. A new point is created in the vector between them for each of these pairs, this new point is located in a random percent of the way from the original point [25]. The ADASYN technique, on the other hand, adds a small random bias to the points after generating the samples, not making them linearly related to their parents. Although this is a small change, it causes an increase of the variance in synthetic data [25].

The parameters determined for the ADASYN technique were the cough data, labels, the number of k -nearest neighbors and beta value. The number of k -nearest neighbors was set to 5. Beta value is the desired level of balance, where 0 means that the size of the minority class will not be changed, and 1 means that the minority class will be ADASYNed to have (approximately, due to rounding) the same size as the majority class [26]. This value was chosen as 1. In this study, thanks to the use of the ADASYN oversampling technique, 34 synthetic positive samples were generated. Thus, 82 positive cough sounds have been available. In total, 155 cough sounds were reached, of which 73 were Non-

COVID-19 and 82 were COVID-19. As a result of the pre-processing, the number of cough data in the dataset was augmented.

2.3 Feature Extraction

Dragomiretskiy and Zosso in 2014 [20] has proposed VMD model. It is a non-recursive optimization signal decomposition method that employs the Hilbert transform and Wiener filtering. The method decomposes the real valued signal into a finite number of independent modes (IMFs) [20]. In the VMD method, it is considered that each mode has a limited bandwidth of center frequency. In this method, the sum of each mode's predicted bandwidth is also minimized under the constraint that the sum of each mode equals the original signal [27]. Detailed description of the technique and mathematical formulas can be found in the reference [20].

Before the decomposition process, values of VMD parameters should be determined. In this study, decomposition number of modes (k), data fidelity constrained (α) and tolerance convergence criteria (tol) were determined as 5, 120 and 10^{-7} respectively. These parameters were determined according to literature studies associated with sound signals [21, 28].

Choosing the decomposition number of modes (k) as 5 was also supported by correlation analysis. This analysis was carried out utilizing the study of Yang, et al. [29]. Researchers proposed the analysis of the Spearman correlation coefficient between the reconstructed signal from IMFs and the original signal. According to them, if the correlation coefficient reaches the determined threshold value, the VMD is considered to be sufficiently decomposed. Otherwise, k is incremented. In this study, this principle was adopted. The threshold value was determined as 0.80 because it represents very high correlation between sequences. k value was set to 2 initially. Then, VMD decomposition was carried out on each of COVID-19 and Non COVID-19 cough sounds to obtain k IMFs. After that, Spearman correlation coefficient was calculated between reconstructed and original cough sounds. The k value was increased as long as correlation coefficient was less than 0.80. As a result of this process, the k value was found to be 4 for some cough sounds and 5 for others. Choosing a k value of 4 causes insufficient decomposition for cough sounds where this value is found as 5. In the end, it was decided to have a k value of 5 since it included all sounds in the study.

The 5-layer VMD method used in cough sound signals of Non COVID-19 subjects (a) and COVID-19 patients (b) is shown in Figure 2.

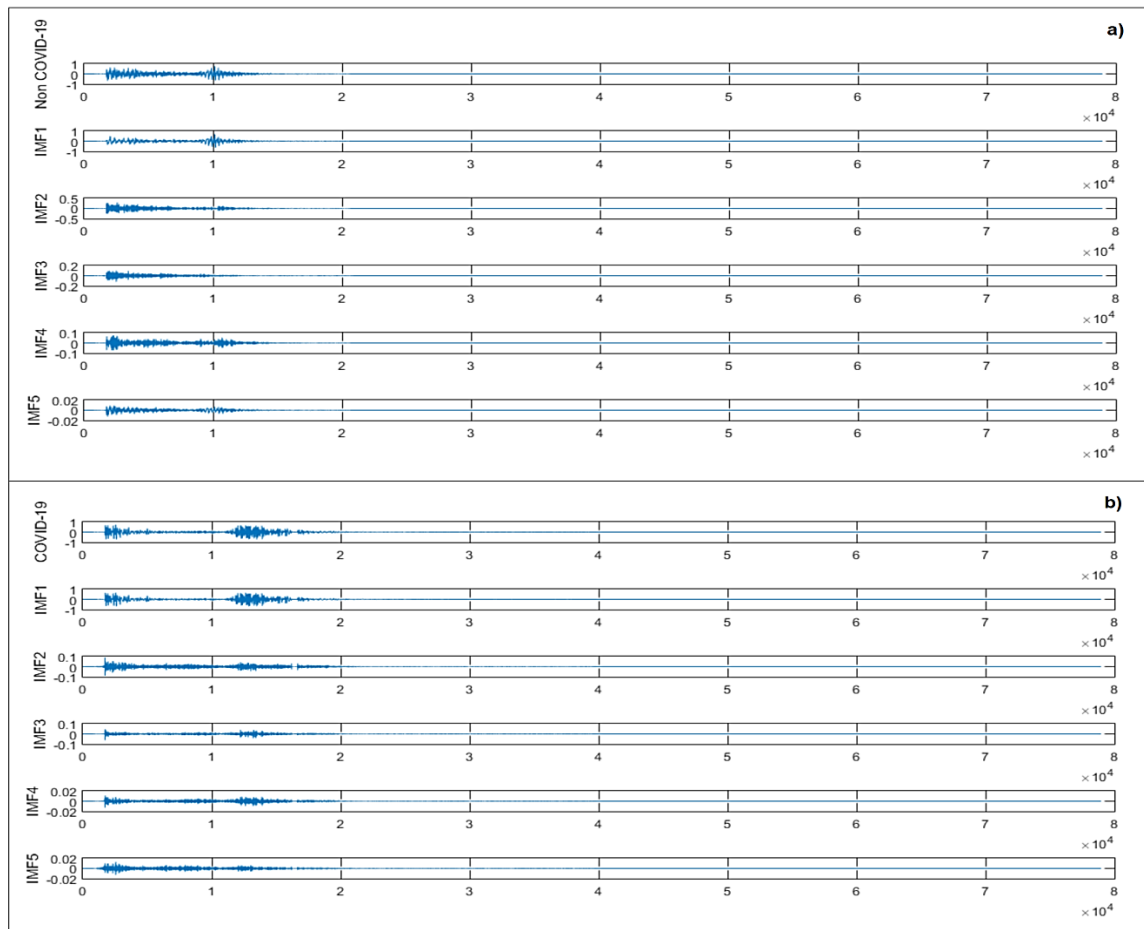


Figure 2. 5-Layer VMD decomposition a) of Non COVID-19 cough sound b) of COVID-19 cough sound

VMD independent modes can capture the distinctive features of signals at different frequencies. Therefore, following features was extracted from each of the modes (IMFs) such that will be effective for the analysis and discrimination of cough sounds.

i. Statistical features

Cough sounds of COVID-19 patients have different signal characteristics than healthy people. COVID-19 coughs may have different statistical characteristics than non-COVID-19 coughs. The variations can be evaluated using the mean, variance, skewness, and kurtosis properties of the time-domain signals at the independent modes. Hence, the mean, variance, skewness and kurtosis statistical values belong to time domain signal of each mode were used as features for COVID 19 disease analysis.

ii. Frequency corresponding to the peak in the spectrum

Figure 3 shows independent modes of Non COVID-19 cough sounds and their associated spectra. As can be seen from this figure, different frequency values correspond to the peak values in each mode. Figure 4 shows independent modes of COVID-19 cough sounds and their associated spectra. Here, too, different frequency values correspond to the peak values in each mode. The frequency values corresponding to the peaks differ not only according to the modes, but also according to the cough sounds of COVID-19 and Non-COVID-19. Therefore, the frequency corresponding to the peak in the spectrum was used as feature in the analysis.

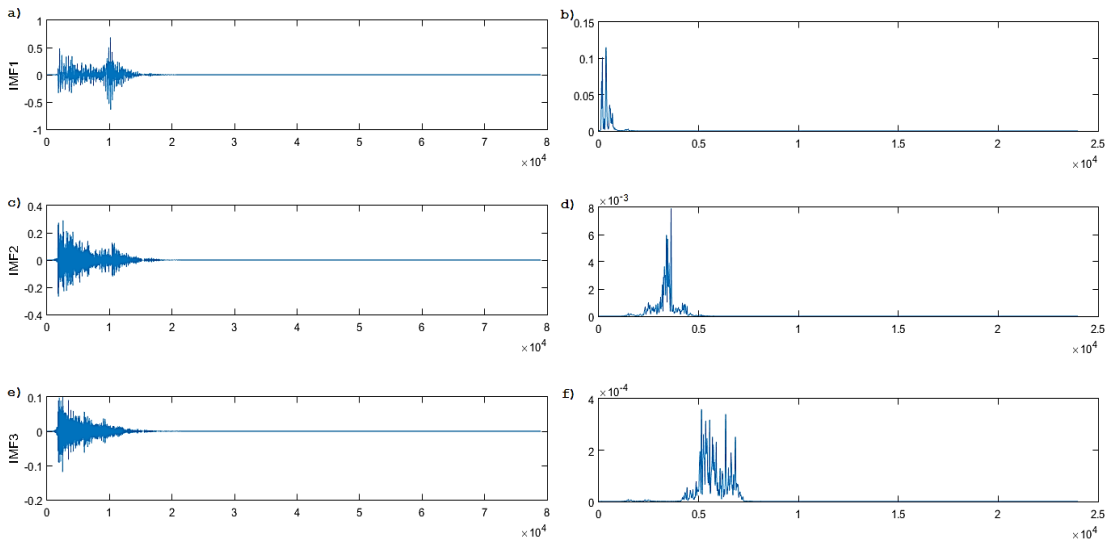


Figure 3. Independent 3 modes of Non COVID-19 cough sound signal and their spectrums (a) IMF1 signal (b) IMF1 signal spectrum (c) IMF2 signal (d) IMF2 signal spectrum (e) IMF3 signal (f) IMF3 signal spectrum

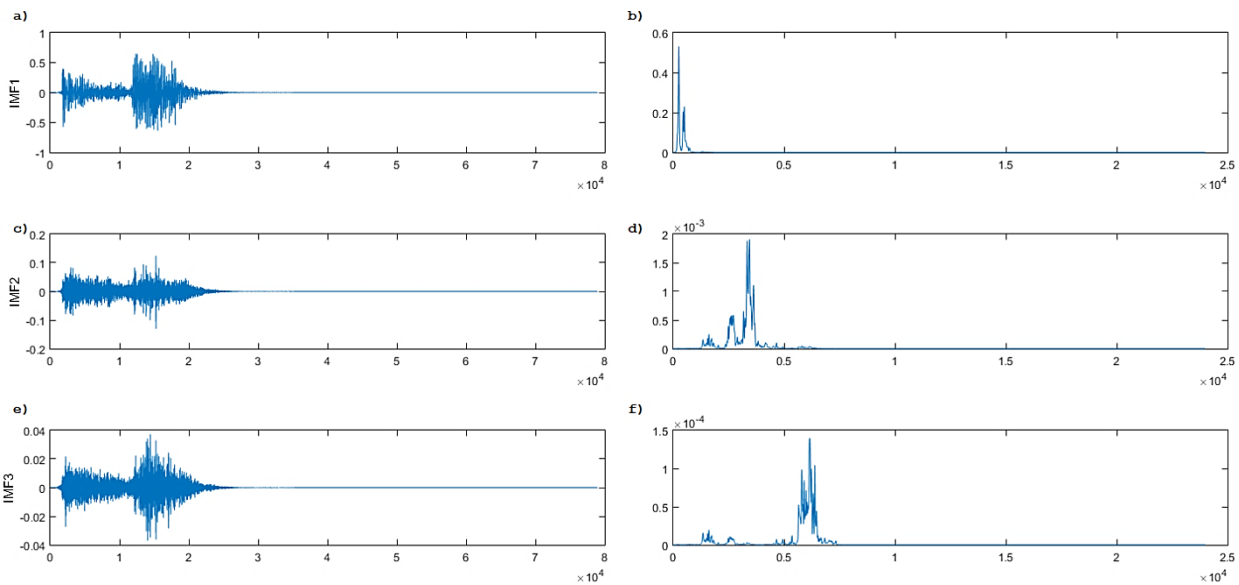


Figure 4. Independent 3 modes of COVID-19 cough sound signal and their spectrums (a) IMF1 signal (b) IMF1 signal spectrum (c) IMF2 signal (d) IMF2 signal spectrum (e) IMF3 signal (f) IMF3 signal spectrum

iii. Peak amplitude

Time-domain peak amplitudes of coughs belong to Non COVID-19 subjects and COVID-19 patients varies. This has led us to use this value as feature for COVID-19 disease analysis.

iv. Energy

In this study, energy of time domain signal at each mode was calculated as seen in Eq. 1 and it was used as a feature for analysis of COVID-19 disease. In the Eq. 1, N denotes the total number k^{th} mode's time domain signal samples, $x_k(n)$ is the k^{th} mode's time domain signal.

$$E_k = \sum_{n=1}^N |x_k(n)|^2 \tag{Eq. 1}$$

v. Entropy measures

Entropies are mathematical algorithms developed to measure repeatability, predictability, and complexity in a signals [30]. In this study, Permutation Entropy, Renyi's Entropy and Spectral Entropy measures were calculated for time domain signal of each mode as features for analysis of COVID-19.

Permutation entropy (PerEnt) measures the randomness of a signal [31]. A high PerEnt value indicates that the signal is more random. It is considered that the randomness of Non-COVID-19 cough sound is different from that of the COVID-19 cough sound. This measure is calculated as stated in the reference [21].

Renyi's entropy (ReEnt) gives information about the spectral complexity of the signal [32]. It is calculated as in reference [21].

Spectral entropy (SpecEnt) presents the regularity of signal [32]. The regularity of independent modes' signals of Non-COVID-19 cough sounds may differ from those of the COVID-19 patients' coughs. It is computed as in reference [21].

Taking these features from each of the 5 Modes into account, it can be stated that the feature vector of each cough sound signal is obtained by combining the statistical features (mean, variance, skewness, and kurtosis), the frequency corresponding to the peak in the spectrum, peak amplitude, energy, PerEnt, ReEnt, and SpecEnt. Therefore, dimension of resulting feature vector for each cough sound will be 50.

2.4 Feature Selection

In this study, dimension of features for each cough sound signal is too much. Using all of these features can both reduce performance and require more time. However, not all features may be effective in differentiating COVID-19 and Non COVID-19 cough sounds for the purpose of the study. Therefore, it is necessary to determine the most effective ones among the extracted features. This process will reduce the processing time of the next step, the classification process, and will contribute to high performance by eliminating the redundant features.

ReliefF algorithm gives positive weights to features in the same class that are close to each other, and negative weights to features in the other class that are close to each other [33]. In this way, it calculates a relevancy index for each feature. A high relevance index will be assigned to features that result in the best class separation across all observations in the training set [33]. In this study, ReliefF feature selection algorithm was chosen to determine the most effective features for separating of COVID-19 and Non COVID-19 cough sounds. With this algorithm, 9 features were selected among 50 features as effective. These features are listed below.

- ✓ IMF1-Skewness
- ✓ IMF1-Energy
- ✓ IMF1- ReEnt
- ✓ IMF2-Kurtosis
- ✓ IMF2-Frequency corresponding to the peak in the spectrum
- ✓ IMF2-Peak Amplitude
- ✓ IMF2-ReEnt
- ✓ IMF3-Frequency corresponding to the peak in the spectrum
- ✓ IMF5-Kurtosis

Considering the selected features, it can be said that Mode-1 (IMF1) and Mode-2 (IMF2) are the best modes to characterize the signals. Moreover, it is seen that kurtosis among the statistical features, frequency corresponding to the peak in the spectrum and RenEnt among the entropies more effective than others.

2.5 Classification Using Ensemble Machine Learning Methods

Ensemble learning technique puts together a group of independent learners to improve the model's performance [34]. Because its variance is decreased, the combined estimator is often superior than any single-based estimator [35]. The most well-known of these ensemble methods and used also in this study are Random Forests (RF), Gradient Boosting Machines (GBM) and Adaboost.

Random Forest was declared by Tin Kam Ho [36] in 1995. It's frequently used for classification as well as regression. The RF method uses the bagging technique to build an ensemble of decision trees. It is based on the developing of many decision trees depending on random data and random variable selection. Thus, the forest's bias usually increases slightly (in comparison to the bias of a single non-random tree), but its variance drops as well, frequently more than compensating for the bias increase, resulting in a superior overall model [37].

Yoav Freund and Robert Schapire [38] introduced Adaboost. It focuses on instances that were classified incorrectly. To begin, weights are assigned to the samples in the training set to establish the focus level [39]. During the first iteration, all samples in the training set are assigned the same weight. With the increase in the number of iterations, the weights of the misclassified samples increase. In the same time, the weights of correctly classified samples are gradually reduced. Additionally, when using the produced ensemble to make a prediction, weights are applied to individual baseline learners based on their aggregate prediction performance [40]. Variance reduction occurs since the models are built iteratively on randomly sampled but re-weighted training samples [40].

Gradient Boosting Machines is the ensemble method based on boosting. This method, like the adaboost method, iteratively builds base learners by reweighting misclassified observations. GBMs, on the other hand, vary from AdaBoost in that they calculate weights using the loss function's negative partial derivatives at each training observation [40].

Evaluation of the COVID-19 and Non COVID-19 cough classifications performed with the mentioned ensemble learning methods was carried out with the k cross validation technique. Classically, the value of k was determined as 10. Performance assessment was made with classification accuracy (CA) in Eq. (2), sensitivity in Eq. (3), specificity in Eq. (4), precision in Eq. (5), F-score in Eq. (6), Kappa statistic in Eq. (7) and AUC metrics by benefitting the confusion matrix obtained at the end of each classification. Table 2 represents the confusion matrix structure in the classifications of this study.

Table 2. Confusion matrix structure

		Predicted Class	
		<u>Non-COVID19</u>	<u>COVID-19</u>
True Class	<u>Non-COVID19</u>	TP	FN
	<u>COVID-19</u>	FP	TN

$$CA = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad \text{Eq. 2}$$

$$Sensitivity(Sens.) = \frac{TP}{TP+FN} \quad \text{Eq. 3}$$

$$Specificity(Spec.) = \frac{TN}{TN+FP} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{Precision (P)} = \frac{TP}{TP+FP} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{F-score} = 2 \times \frac{\text{precision} \times \text{sensitivity}}{\text{precision} + \text{sensitivity}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$Kappa\ statistics(K) = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \tag{Eq. 7}$$

Pe in Eq. (7) is calculated as in Eq. (8).

$$P_e = \frac{[(TP + FP) \times (TP + FN)] + [(FN + TN) \times (FP + TN)]}{(TP + TN + FP + FN)^2} \tag{Eq. 8}$$

3 RESULTS AND DISCUSSION

In this study, for the distinguishing of COVID-19 and Non COVID-19 cough sounds, 50 features were extracted from them using VMD method. After that, most effective 9 features were selected by ReliefF algorithm. The results obtained by using these effective features with RF, GBM and Adaboost methods are shown in Table 3. Table 4, Table 5 and Table 6 show the confusion matrices from which these results were achieved by the RF, GBM and Adaboost methods, respectively.

Table 3. Performance of Ensemble Learning Methods for classification of 155 cough sounds

Ensemble Learning Method	CA (%)	Sens. (%)	Spec. (%)	P (%)	F-score	K	AUC (%)
RF (number of trees: 85, Number of attributes considered each split: 2)	92.26	83.56	100.00	100.00	91.04	0.84	91.78
GBM (Scikit-learn, the number of trees: 270, learning rate: 0.899)	94.19	87.67	100.00	100.00	93.43	0.88	93.84
Adaboost (the number of estimators: 100, learning rate: 1)	81.94	79.45	84.15	81.69	80.50	0.64	81.80

Table 4. Confusion matrix obtained by effective features and RF

	Non COVID-19	COVID-19
Non COVID-19	61	12
COVID-19	0	82

Table 5. Confusion matrix obtained by effective features and GBM

	Non COVID-19	COVID-19
Non COVID-19	64	9
COVID-19	0	82

Table 6. Confusion matrix obtained by effective features and Adaboost

	Non COVID-19	COVID-19
Non COVID-19	58	15
COVID-19	13	69

As presented in Table 3, the highest performance was obtained using the GBM ensemble method. By this method, all of the COVID-19 cough sounds were detected correctly, as seen in Table 5. In other

words, 100% specificity and precision measures could be obtained. Only 9 cough sounds of subjects diagnosed with Non COVID-19 were misclassified, so 87.67% sensitivity was obtained. This method also produced F-score of 93.43% and AUC of 93.84% values. Also, 0.88 kappa statistics value was reached by this method. As can be seen from Table 3, Table 4 and Table 5, although the RF method recognized all COVID-19 cough sounds like GBM, it was able to recognize fewer Non COVID-19 cough sounds than GBM. Therefore, other performance metrics of RF except for specificity were lower than GBM method. On the other hand, the Adaboost ensemble method provided the lowest performance in terms of all performance measures.

To emphasize the number of data and legitimacy of ADASYN technique, original 121 cough sounds (73 Non COVID-19 and 48 COVID-19) before the augmentation process were also classified using 9 effective features and ensemble learning methods. The results of the classifications are shown in Table 7.

Table 7. Performance of Ensemble Learning Methods for classification of 121 cough sounds

Ensemble Learning Method	CA (%)	Sens. (%)	Spec. (%)	P (%)	F-score	K	AUC (%)
RF (number of trees: 100, Number of attributes considered each split: 2)	80.17	86.30	70.83	81.82	84.00	0.58	78.6
GBM (Scikit-learn, the number of trees: 200, learning rate: 0.921)	81.82	86.30	75.00	84.00	85.14	0.62	80.65
Adaboost (the number of estimators: 100, learning rate: 1)	71.07	78.08	60.42	75.00	76.51	0.39	69.25

Table 7 showed that the highest performance was again obtained with the GBM method. However, if both Table 3 and Table 7 are examined together, it can be seen that although there was no significant change in the recognition success (sensitivity) of Non COVID-19 cough sounds, the recognition success (specificity) of the minority class i.e. COVID-19 coughs were reduced considerably. Because most machine learning algorithms are designed around the assumption of an equal number of samples for each class, the imbalance in the dataset poses a challenge for predictive modelling. This results in models with poor predictive performance, especially for the minority class. The data balancing process performed on a data set with such unbalanced classes has an improving effect on the performance. In this study, this process was carried out using the ADASYN oversampling technique, and the data set was balanced by producing synthetic data belonging to the minority class. Thus cough data were augmented. According to results seen in Table 3 and Table 7, it was concluded that augmentation using ADASYN helps in increasing the performance of classifiers significantly.

There are many studies in the literature to automatically detect COVID-19 by analyzing both COVID-19 and Non COVID-19 cough sounds for early diagnosis. The comparison of this study with only few studies using the "Virufy" dataset as one of the datasets is given in Table 8.

Table 8. Comparison of this study with literature.

Study	Dataset	Type of Sound	Features	Classifiers	Results
[6]	Coswara Coughvid Virufy	Cough	Mel- spectrogram MFCC	Ensemble Deep Learning Model	77.1% AUC
[15]	Coswara Virufy	Cough Breathing Speech	MFCC – RMS – ZCR Spectral Rolloff / Centroid/etc.	Deep Model Shallow classifiers	96.4% AUC 96% CA
[9]	Virufy	Cough	STFT – MFCC	SVM classifier with RBF kernel	95.8% CA 98.6% sens. 91.7% spec.
This study	Virufy	Cough	VMD-based features	RF GBM Adaboost	94.19% CA 87.67% Sens. 100% Spec. 100% Precision 93.43% F-score 0.88% Kappa 93.84% AUC

As it can be seen in Table 8, this study is competitive with other studies that use the Virufy dataset as one of their sets in terms of different performance measures. Moreover, this study produced highest specificity performance metric throughout VMD-based features and GBM ensemble learning method. Despite all this, it should be noted that most of the studies in Table 8 considered not only the Virufy data set, but also different data sets, as well as sounds other than cough sounds. As a result, studies gave the performance criteria seen in Table 8 as average values. For this reason, it would not be right to compare this study with other studies in Table 8 exactly.

Most of the studies in this field in the literature have used different cough sound datasets. Despite the different datasets, this study is also comparable to other studies focusing on the automatic detection of COVID-19. Some of these studies using only cough sound signals gave the AUC value as a measure of success. This study found the AUC success criterion for detection of COVID-19 to be 93.84%. In terms of this metric, this study outperformed Bagad, et al. [5], Chaudhari, et al. [6], Fakhry, et al. [8], Kamble, et al. [10] and Rao, et al. [11] which achieved AUC of 72%, 77.1%, 91.0%, 76.31% and 78.3% respectively. If this study is compared with studies using only cough sounds and showing CA as a measure of success, it outperformed Imran, et al. [7] and Tena, et al. [13] which achieved CA of 92.85% and 90% respectively. Although this study showed lower performance in terms of CA metric than that of Erdoğan and Narin [12] with CA of 98.4%, it provided a higher performance in terms of specificity obtaining 100% success. If we compare with studies using different signals along with cough sounds, this study is better than Coppock, et al. [16] with AUC of 84.6%, Grant, et al. [18] with AUC of 68.36% and Khrijji, et al. [17] with CA of 80.0%. Apart from these, this study is comparable to Melek Manshoury [9], Islam, et al. [14], Aly, et al. [15] and Lella and Pja [19] which accessed CA of 95.86%, CA of 89.2%, 97.5, 93.8%, CA of 96.4% and CA of 95.45%.

Among the studies focused on the automatic detection of COVID-19, there have also been those that used only the lung/breath sounds without including the cough sounds. Raj, et al. [41] performed nonlinear time series and principal component analyses to diagnose the COVID-19 through lung sounds. Tuncer, et al. [42] detect COVID-19 with CA of 95.43% using lung sound, Novel Local Feature Generation Technique and SVM. TUNCER, et al. [43] carried out automated Covid-19 respiratory sound classification with CA of 91.02% by utilizing lung sounds.

Considering the literature studies and their results, it can be said that; Although a detailed comparison cannot be made due to different feature sets, this study can compete with the studies in the

literature. Also, it shows the use of cough sounds alone may be sufficient for COVID-19 detection without the need for other signals.

When the literature studies are evaluated from another perspective, it has been seen that generally similar feature extraction methods, especially MFCC, were used for the analysis of cough sound signals. This study, unlike other studies, examined the VMD method and decompose the each cough sound signal into different independent modes. Then, it extracted several features from these modes to characterize COVID-19 and Non COVID-19 coughs. As a result of using these features with the GBM method, which is one of the ensemble learning methods, the study achieved its purpose and was able to detect COVID-19 with high success by identifying positive and negative cough sounds.

4 CONCLUSION

This study aimed to detect COVID-19 by distinguishing cough sounds of people with the COVID-19 from coughs of healthy people, thus contributing to the diagnosis of COVID-19 disease. For this aim, it used the public Virufy cough sounds dataset, ADASYN oversampling technique, VMD feature extraction method and ensemble machine learning methods namely RF, GBM and Adaboost.

Firstly, the cough sounds included in the study were pre-processed in order to eliminate the imbalance between the classes. In this way, the number of COVID-19 cough sound signals, which were few in number, was increased with the ADASYN technique. Then, 5-layer VMD technique was applied to each cough sound and the sounds were separated into 5 independent modes (IMFs). Since VMD discrimination modes can capture the distinctive features of signals at different frequencies, several features (mean, variance, skewness and kurtosis statistical features, frequency corresponding to the peak in the spectrum, peak amplitude, energy, PerEnt, ReEnt and SpecEnt) were extracted from each mode of every sound. However, it has resulted in the emergence of a large number of features that will force the next step, discrimination of COVID-19 coughs and Non COVID-19 coughs by classification via RF, GBM and Adaboost. Therefore, ReliefF algorithm was used and 9 features were selected as the most effective features for the purpose of this study. Finally, cough sounds were recognized through classification by using 9 active features and RF, GBM, and Adaboost methods. The best performance was obtained by GBM ensemble learning method. All COVID-19 cough sounds were identified correctly and fewer Non COVID-19 sounds were misidentified. So, the diagnosis of COVID-19 from cough sounds were performed with acceptable accuracy.

As a result of the study, it can be said that the cough sound is one of the most prominent symptoms of COVID-19, and even this sound alone can indicate the presence of COVID-19. Just like in this study, with the analysis of cough sounds in digital environments automatically, negativities such as one-to-one interaction and crowded environment in hospitals that accelerate the spread of COVID-19 can be prevented. According to the results of the study, it can also be said that VMD method chosen different from those used in the literature is convenient for cough sound analysis by capturing the distinctive features of signals at different frequencies. Moreover, the augmentation performed to balance the different classes is very important in terms of improving the performance. Also, based on the working principle of ensemble methods by combining multiple models, successful results have been produced for the detection of COVID-19 in the study. Even, the GBM ensemble learning method outperformed the RF and Adaboost methods as each tree corrected the classification error of the previous tree and grew trees sequentially, increasing overall performance.

Although the performed study also requires validation on a larger dataset, the obtained results are very promising and show that detection of COVID-19 based on the automatic classification of only cough sounds is feasible.

Declaration of Ethical Standards

The author declares to comply with all ethical guidelines, including authorship, citation, data

reporting, and original research publication.

Credit Authorship Contribution Statement

The author contributed to the all stages of the work, namely, preprocessing, feature extraction, feature selection, classification using ensemble machine learning methods, the analysis of the results and also 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

This article is an original work and all results have not published previously. Also, this study did not receive any funding or research grants during the study, research or assembly of the manuscript.

Data Availability

The dataset used in the study is open-access Cough Dataset available on "GitHub"(Virufy COVID 19 Open Cough Dataset, GitHub, <https://github.com/virufy/virufy-data>).

REFERENCES

- [1] A. Narin, C. Kaya, and Z. Pamuk, "Automatic detection of coronavirus disease (COVID-19) using X-ray images and deep convolutional neural networks," *Pattern Anal Appl*, pp. 1-14, May 9 2021.
- [2] M. Pahar, M. Klopper, R. Warren, and T. Niesler, "COVID-19 cough classification using machine learning and global smartphone recordings," *Comput Biol Med*, vol. 135, p. 104572, Aug 2021.
- [3] P. Mouawad, T. Dubnov, and S. Dubnov, "Robust Detection of COVID-19 in Cough Sounds: Using Recurrence Dynamics and Variable Markov Model," *SN Comput Sci*, vol. 2, no. 1, p. 34, 2021.
- [4] A. Pal and M. Sankarasubbu, "Pay Attention to the cough: Early Diagnosis of COVID-19 using Interpretable Symptoms Embeddings with Cough Sound Signal Processing," in *36th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing (SAC '21)*, March 22–26, 2021, pp. 620-628.
- [5] P. Bagad et al., "Cough Against: COVID Evidence of COVID-19 Signature in Cough Sounds," Preprint from arXiv, 2020.
- [6] G. Chaudhari et al., "Virufy: Global Applicability of Crowdsourced and Clinical Datasets for AI Detection of COVID-19 from Cough," *ArXiv*, vol. 2011.13320, 2020.
- [7] A. Imran et al., "AI4COVID-19: AI enabled preliminary diagnosis for COVID-19 from cough samples via an app," *Inform Med Unlocked*, vol. 20, p. 100378, 2020.
- [8] A. Fakhry, X. Jiang, J. Xiao, G. Chaudhari, A. Han, and A. Khanzada, "Virufy: A Multi-Branch Deep Learning Network for Automated Detection of Covid-19," preprint from arXiv:2103.01806, 2021.
- [9] N. Melek Manshoury, "Identifying COVID-19 by using spectral analysis of cough recordings: a distinctive classification study," *Cogn Neurodyn*, pp. 1-15, Jul 29 2021.
- [10] M. R. Kamble et al., "PANACEA cough sound-based diagnosis of COVID-19 for the DiCOVA 2021 Challenge," arXiv preprint arXiv:2106.04423, 2021.
- [11] S. Rao, V. Narayanaswamy, M. Esposito, J. Thiagarajan, and A. Spanias, "Deep Learning with hyper-parameter tuning for COVID-19 Cough Detection," in *2021 12th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)*, 2021, pp. 1-5: IEEE.

- [12] Y. E. Erdoğan and A. Narin, "COVID-19 detection with traditional and deep features on cough acoustic signals," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 136, p. 104765, 2021.
- [13] A. Tena, F. Clarià, and F. Solsona, "Automated detection of COVID-19 cough," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 71, p. 103175, 2022.
- [14] R. Islam, E. Abdel-Raheem, and M. Tarique, "A study of using cough sounds and deep neural networks for the early detection of COVID-19," *Biomedical Engineering Advances*, vol. 3, p. 100025, 2022.
- [15] M. Aly, K. H. Rahouma, and S. M. Ramzy, "Pay attention to the speech: COVID-19 diagnosis using machine learning and crowdsourced respiratory and speech recordings," *Alexandria Engineering Journal*, 2021.
- [16] H. Coppock, A. Gaskell, P. Tzirakis, A. Baird, L. Jones, and B. W. Schuller, "End-2-End COVID-19 Detection from Breath & Cough Audio," Preprint from arXiv:2102.08359v1, 2021.
- [17] L. Khriji, A. Ammari, S. Messaoud, S. Bouaafia, A. Maraoui, and M. Machhout, "COVID-19 Recognition Based on Patient's Coughing and Breathing Patterns Analysis: Deep Learning Approach," in *2021 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2021, pp. 185-191: IEEE.
- [18] D. Grant, I. McLane, and J. West, "Rapid and scalable COVID-19 screening using speech, breath, and cough recordings," in *2021 IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI)*, 2021, pp. 1-6: IEEE.
- [19] K. K. Lella and A. Pja, "Automatic diagnosis of COVID-19 disease using deep convolutional neural network with multi-feature channel from respiratory sound data: cough, voice, and breath," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 2, pp. 1319-1334, 2022.
- [20] K. Dragomiretskiy and D. Zosso, "Variational mode decomposition," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 3, pp. 531-544, 2014.
- [21] S. Deb, S. Dandapat, and J. Krajewski, "Analysis and classification of cold speech using variational mode decomposition," *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 296-307, 2017.
- [22] I. Kononenko, "Estimating Attributes: Analysis and Extensions of Relief," presented at the *European Conference on Machine Learning*, 1994.
- [23] J. Shuja, E. Alanazi, W. Alasmay, and A. Alashaikh, "COVID-19 open source data sets: a comprehensive survey," *Applied Intelligence*, vol. 51, no. 3, pp. 1296-1325, 2021.
- [24] H. He, Y. Bai, E. A. Garcia, and S. Li, "ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning," presented at the *2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2008.
- [25] F. H. K. d. S. Tanaka and C. Aranha, "Data augmentation using GANs," arXiv preprint arXiv:1904.09135, 2019.
- [26] H. He and E. A. Garcia, "Learning from imbalanced data," *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, vol. 21, no. 9, pp. 1263-1284, 2009.
- [27] J. Zhu, P. Wu, H. Chen, J. Liu, and L. Zhou, "Carbon price forecasting with variational mode decomposition and optimal combined model," *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, vol. 519, pp. 140-158, 2019.
- [28] B. Karan, K. Mahto, and S. S. Sahu, "Detection of Parkinson disease using variational mode decomposition of speech signal," in *2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2018, pp. 0508-0512: IEEE.
- [29] H. Yang, Y. Cheng, and G. Li, "A denoising method for ship radiated noise based on Spearman variational mode decomposition, spatial-dependence recurrence sample entropy, improved wavelet threshold denoising, and Savitzky-Golay filter," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 3, pp. 3379-3400, 2021.

- [30] J. M. Yentes, N. Hunt, K. K. Schmid, J. P. Kaipust, D. McGrath, and N. Stergiou, "The appropriate use of approximate entropy and sample entropy with short data sets," *Annals of biomedical engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 349-365, 2013.
- [31] C. Bandt and B. Pompe, "Permutation entropy: a natural complexity measure for time series," *Physical review letters*, vol. 88, no. 17, p. 174102, 2002.
- [32] R. Sharma, R. B. Pachori, and U. R. Acharya, "Application of entropy measures on intrinsic mode functions for the automated identification of focal electroencephalogram signals," *Entropy*, vol. 17, no. 2, pp. 669-691, 2014.
- [33] A. Stief, J. R. Ottewill, and J. Baranowski, "Relief F-based feature ranking and feature selection for monitoring induction motors," in *2018 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*, 2018, pp. 171-176: IEEE.
- [34] S. Mao, J.-W. Chen, L. Jiao, S. Gou, and R. Wang, "Maximizing diversity by transformed ensemble learning," *Applied Soft Computing*, vol. 82, p. 105580, 2019.
- [35] H. Liu and L. Zhang, "Advancing Ensemble Learning Performance through data transformation and classifiers fusion in granular computing context," *Expert Systems with Applications*, vol. 131, pp. 20-29, 2019.
- [36] T. K. Ho, "Random decision forests," in *Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition*, 1995, vol. 1, pp. 278-282: IEEE.
- [37] T. Pinto, I. Praça, Z. Vale, and J. Silva, "Ensemble learning for electricity consumption forecasting in office buildings," *Neurocomputing*, vol. 423, pp. 747-755, 2021.
- [38] Y. Freund and R. E. Schapire, "A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting," *Journal of computer and system sciences*, vol. 55, no. 1, pp. 119-139, 1997.
- [39] O. Sagi and L. Rokach, "Ensemble learning: A survey," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 8, no. 4, p. e1249, 2018.
- [40] V. A. Dev and M. R. Eden, "Formation lithology classification using scalable gradient boosted decision trees," *Computers & chemical engineering*, vol. 128, pp. 392-404, 2019.
- [41] V. Raj, A. Renjini, M. Swapna, S. Sreejyothi, and S. Sankararaman, "Nonlinear time series and principal component analyses: Potential diagnostic tools for COVID-19 auscultation," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 140, p. 110246, 2020.
- [42] T. Tuncer, E. Akbal, E. Aydemir, S. B. Belhaouari, and S. Dogan, "A novel local feature generation technique based sound classification method for covid-19 detection using lung breathing sound," *European Journal of Technique (EJT)*, vol. 11, no. 2, pp. 165-174, 2021.
- [43] T. TUNCER, E. Aydemir, F. ÖZYURT, S. Dogan, S. B. Belhaouari, and E. Akbal, "An automated Covid-19 respiratory sound classification method based on novel local symmetric Euclidean distance pattern and ReliefF iterative MRMR feature selector," *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 334-343, 2021.



FARKLI ÇÖZÜCÜ ORTAMLARINDA TUNGSTOFOSFORİK ASİT KATALİZÖRLÜĞÜNDE KİTOSANDAN LEVULİNİK ASİT ÜRETİMİ

¹Şeyma ÖZDEMİR , ²Berna NİŞ , ^{3*}Burçak KAYA ÖZSEL 

Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Bölümü, Bursa, TÜRKİYE
¹ozdemirseyma@windowslive.com, ²berna.nis@btu.edu.tr, ³burcak.kaya@btu.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Kitosan ve glukozdan hidrotermal katalitik dönüşüm ile levulinik asit elde edilmiştir.
- Tungstofosforik asit katalizörü levulinik asit verimini arttırmaktadır.
- Sulu ortamda kullanılan asidik iyonik sıvı kitosan hidrolizi ve levulinik asit oluşumu üzerine etkilidir.



FARKLI ÇÖZÜCÜ ORTAMLARINDA TUNGSTOFOSFORİK ASİT KATALİZÖRLÜĞÜNDE KİTOSANDAN LEVULİNİK ASİT ÜRETİMİ

¹Şeyma ÖZDEMİR , ²Berna NİŞ , ³Burçak KAYA ÖZSEL 

Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Bölümü, Bursa, TÜRKİYE
¹ozdemirseyma@windowslive.com, ²berna.nis@btu.edu.tr, ³burcak.kaya@btu.edu.tr

(Received: 11.11.2022; Accepted in Revised Form: 07.02.2023)

ÖZ: Bu çalışmada kitosan ve glukozun farklı çözücü ortamlarında belirli sıcaklık ve sürede tungstofosforik asit katalizörlüğünde tek basamakta hidrolizi ve levulinik aside dönüşümleri incelenmiştir. Katalitik dönüşüm prosesinde kütlece 1:5 oranında (yardımcı çözücü-su) sulu ortama eklenen γ -valerolakton, kitosanın levulinik aside dönüşüm verimini değiştirmeyen, glukoz dönüşüm verimini yaklaşık iki katına çıkarmıştır. Sulu ortama aynı oranda 1-bütül-3-metilimidazolyum hidrojen sülfat ilavesinde ise hem kitosan hem de glukoz dönüşümlerinde levulinik asit verimi sırasıyla %3,7 ve %22,7'ye ulaşmıştır. Kitosanın su/1-bütül-3-metilimidazolyum hidrojen sülfat ortamında dönüşümü sonrası toplam indirgen şeker miktarı ve katı atığın FT-IR spektrumu incelendiğinde iyonik sıvının asidik karakterinin hidroliz ve dönüşüm üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Katalizörsüz sulu ortamda biyokütle dönüşümünde levulinik asit oluşmazken, tungstofosforik asit kullanıldığında kitosandan %3,1, glukozdan ise %7,0 verimle levulinik asit elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kitosan, Tungstofosforik Asit, Levulinik Asit, İyonik Sıvı, γ -Valerolakton

Production of Levulinic Acid from Chitosan in Different Solvent Mediums Using Tungstophosphoric Acid as Catalyst

ABSTRACT: In this study, tungstophosphoric acid catalyzed one-step hydrolysis and conversion of chitosan and glucose to levulinic acid in different solvent mediums at a certain temperature and time were investigated. In catalytic conversion process, γ -valerolactone added to the aqueous medium at a 1:5 mass ratio (cosolvent-water) did not change the levulinic acid conversion efficiency of chitosan, but increased glucose conversion efficiency by two-fold. When 1-butyl-3-methylimidazolium hydrogensulfate was added to the aqueous medium at the same ratio, the yield of levulinic acid in both chitosan and glucose conversion reached 3.7% and 22.7%, respectively. When the total amount of reducing sugar after the conversion of chitosan in water/1-butyl-3-methylimidazolium hydrogensulfate medium and FT-IR spectrum of solid waste were examined, it can be seen that the acidic character of ionic liquid is effective on hydrolysis and conversion. While no levulinic acid was obtained during the biomass conversion in aqueous medium without any catalyst, by using tungstophosphoric acid, levulinic acid was obtained with a yield of 3.1% from chitosan and 7.0% from glucose.

Keywords: Chitosan, Tungstophosphoric Acid, Levulinic acid, Ionic Liquid, γ -Valerolactone

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Levulinik asit ($C_5H_8O_3$), yapısındaki karboksilik asit ve keton grupları sayesinde çok yönlü sentezler için kullanılabilen, ticari olarak petrokimyasal yolla maleik asit ve furfuril alkolden elde edilen değerli bir öncü bileşiktir. Günümüzde fosil kaynakların hızla tükenmekte oluşu ve yarattıkları çevresel sorunlar, birçok endüstriyel kimyasalın ve yakıtın sentezinde önemli anahtar rol oynayan levulinik asidin, alternatif olarak ucuz ve kolay bulunan karbonhidrat içerikli yenilenebilir biyokütle kaynaklarından eldesini önemli hale getirmiştir [1]. Bu kapsamda kullanılacak biyokütle kaynakları arasında doğada en çok bulunan ikinci doğal biyopolimer olan, β -(1,4)-N-asetilglukozamin birimlerinden oluşan kitin ve kitinin deasetillenmiş formu kitosan da yer almaktadır. Sahip olduğu

fiziksel ve kimyasal özelliklerden dolayı kitosanın gıda, ilaç, tekstil ve kozmetik gibi farklı endüstriyel alanlarda kullanımı son zamanlarda oldukça yaygınlaşmıştır. Kitosanın sudaki çözünürlüğünün düşük olması kullanımını sınırlandırırken bu polimerik yapının hidroliz reaksiyonu ile daha küçük birimlerine parçalanması uygulama alanlarını arttırmak için tercih edilen bir yoldur [2].

Biyokütle materyallerinin değerli kimyasallara dönüşümünde aktivitesi yüksek, yeşil, sürdürülebilir katalizörlerin, ucuz hammaddelerin ve uygun çözücü sistemlerinin kullanımı maliyeti düşürüp verimi arttırmada oldukça önemlidir. Yapılan bu çalışmada kitosan biyokütlesinin farklı çözücü ortamlarında, belirli sıcaklık ve sürede, tungstofosforik asit katalizörlüğünde hidrolizi ve levulinik aside dönüşüm verimi incelenmiş ve sonuçlar en basit yapıya sahip model bileşik olarak kullanılan glukoz ile karşılaştırılmıştır. Çözücü sistemi olarak yeşil ve çevreci olması nedeniyle su tercih edilirken, katalitik etki göstermesi ön görülen γ -valerolaktonun (GVL) ve 1-bütül-3-metilimidazolyum hidrojen sülfatın ([Bmim]HSO₄) yardımcı çözücü olarak etkisi incelenmiştir. Biyobazlı ve çevreci bir çözücü olan GVL'nin biyokütle dönüşüm uygulamalarında kullanımı oldukça yeni olmasına rağmen [3]–[6] karbonhidratların değerli kimyasallara dönüşümü sırasında istenmeyen yan reaksiyonlar sonucu oluşan, çözünmeyen amorf makromoleküllerin karışımı olan hüminleri çözdüğü yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [7]–[9]. Bu avantajı sayesinde levulinik asit (LA) eldesinde çözücü sistemi olarak su/GVL kullanılması ile ön işlem maliyetinin de önüne geçilebileceği öngörülmektedir. Bir diğer yardımcı çözücü olan [Bmim]HSO₄ ise asidik karaktere sahip bir iyonik sıvıdır. Erime noktası 100°C altında olan ve bir katyon ile bir anyondan oluşan iyonik sıvılar (IL), düşük buhar basıncına, termal kararlılığa, yüksek iletkenliğe sahip olması gibi özellikleri ve çeşitli anyon/katyon kombinasyonları ile farklı amaçlarla hedefe yönelik olarak sentezlenebilmeleri nedeniyle son yıllarda biyokütle dönüşümü uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. IL olarak [Bmim]HSO₄'ın tercih edilmesinin sebebi, sahip olduğu asitlik sayesinde kitosan hidrolizinde glikozit bağlarının kırılmasını kolaylaştırarak reaksiyona katalitik etkisinin olduğunun bilinmesidir [10]. Çalışmada katalizör olarak heterojen ve homojen asit katalizli sistemlerde sıklıkla kullanılan bir heteropoliasit olan tungstofosforik asit tercih edilmiştir. Tungstofosforik asit, H₂SO₄ veya HCl gibi inorganik asitler ile kıyaslandığında korozif etkisinin olmaması, termal kararlılığa sahip olması ve kuvvetli Brønsted asitliği göstermesi nedeniyle levulinik asit eldesi için uygun bir katalizör olarak görülmüştür [11], [12].

2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada biyokütle olarak orta moleküler ağırlıklı kitosan (75-85 deasetilatlı, Sigma-Aldrich) ve d-(+)-glukoz monohidrat (Sigma-Aldrich), katalizör olarak tungstofosforik asit hidrat (H₃O₄PW₁₂.xH₂O, Merck), çözücü ortamı olarak ise saf su ile birlikte 1-bütül-3-metilimidazolyum hidrojen sülfat (\geq 98, Acros Organics) ve γ -valerolakton (%99, Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. DNS reaktifinin hazırlanmasında 3,5-dinitrosalisik asit (Sigma-Aldrich), sodyum sülfat (Panreac) ve potasyum-sodyumtartarat tetrahidrat (Horasan Kimya) kullanılmıştır. HPLC analizlerinde kalibrasyon grafiklerini oluşturmak için analitik standart olarak 5-hidroksimetilfurfural (5-HMF, Sigma-Aldrich) ve levulinik asit (Sigma-Aldrich), mobil faz olarak metanol (\geq 99,9, Sigma-Aldrich) ve fosforik asit (%85, Merck) kullanılmıştır.

2.2. Deneysel Koşulları ve Analizler (Experimental Conditions and Analysis)

Kitosan ve glukoz dönüşümlerinde daha önce yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak 0,18 g biyokütle, 0,075 g katalizör ve kütlece 1:5 (yardımcı çözücü-su) oranında çözücü sistemi kullanılmış ve deneyler kesikli tip özel üretim reaktörde (50 mL) 180°C'de 1 saat sürede gerçekleştirilmiştir [13]. Deneysel sonunda reaktörden alınan çözeltilerin 5-HMF ve LA içeriklerinin analizi sıvı kromatografisi (HPLC, Agilent) ile ACE C18 kolonda (250 x 4,6 mm) 210 ve 280 nm dalga boyunda (UV dedektör) %0,001 fosforik asit ve metanol hareketli fazları kullanılarak gerçekleştirilirken, çözeltiler analiz öncesi

filtrelenmiştir. Tüm dönüşüm deneyleri iki tekrarlı (gerektiğinde üç tekrarlı) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Deney sonunda çözeltilerde kalan toplam indirgen şeker miktarı glukoz eşdeğeri olarak DNS yöntemi [13] ile 540 nm’de UV-VIS Spektrofotometrede (Agilent, Carry60) absorbans okumaları yapılarak belirlenmiştir.

Dönüşüm deneyleri sonrası LA ve 5-HMF ürün verimleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{Verim LA (\%)} = (m2/m1) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Verim 5-HMF (\%)} = (m3/m1) \times 100 \quad (2)$$

m1: başlangıç biyokütle miktarı (g)

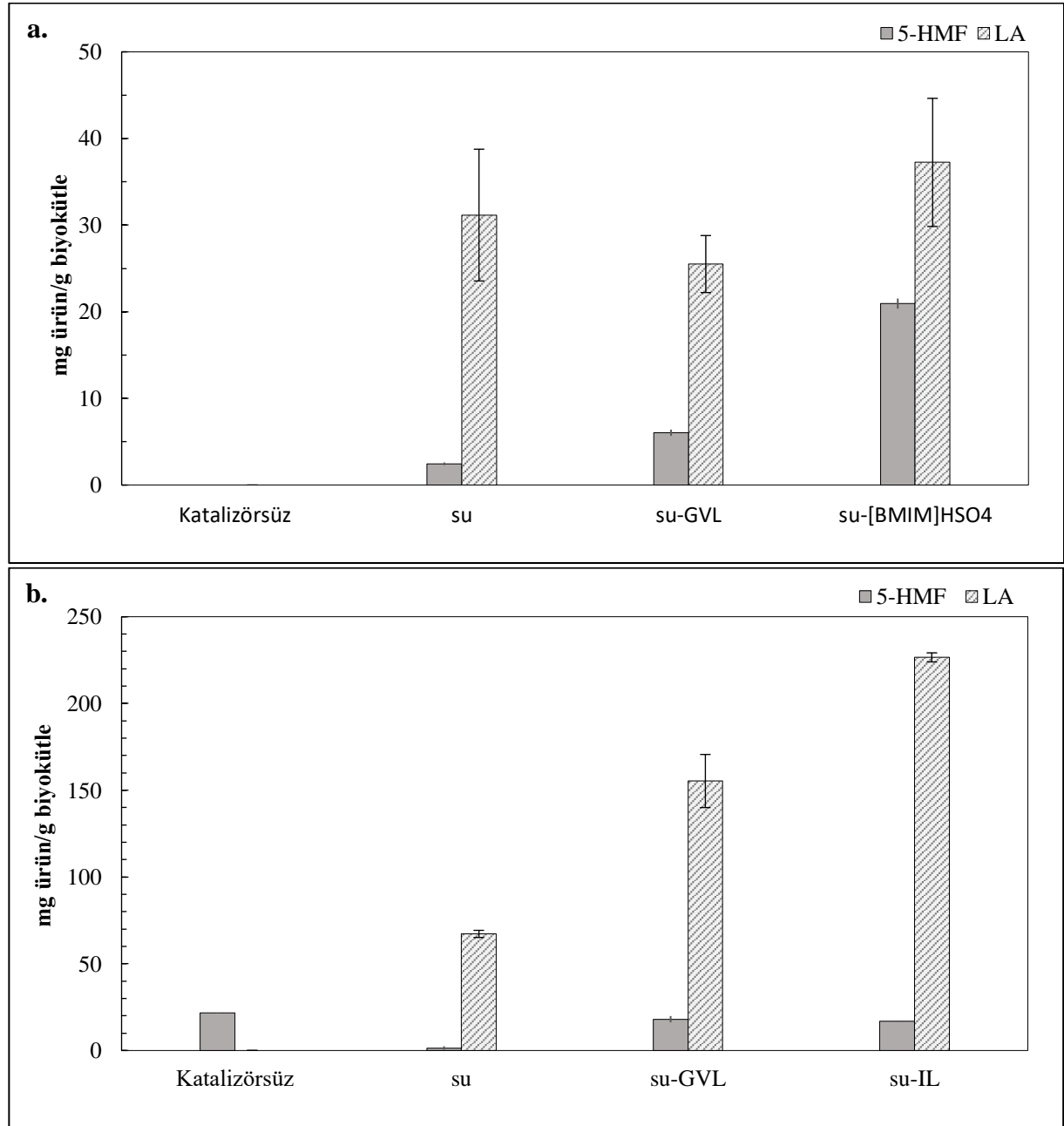
m2: elde edilen LA miktarı (g)

m3: elde edilen 5-HMF miktarı (g)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Kitosan ve Glukozun Levulinik Aside Katalitik Dönüşümü (Catalytic Conversion of Chitosan and Glucose to Levulinic Acid)

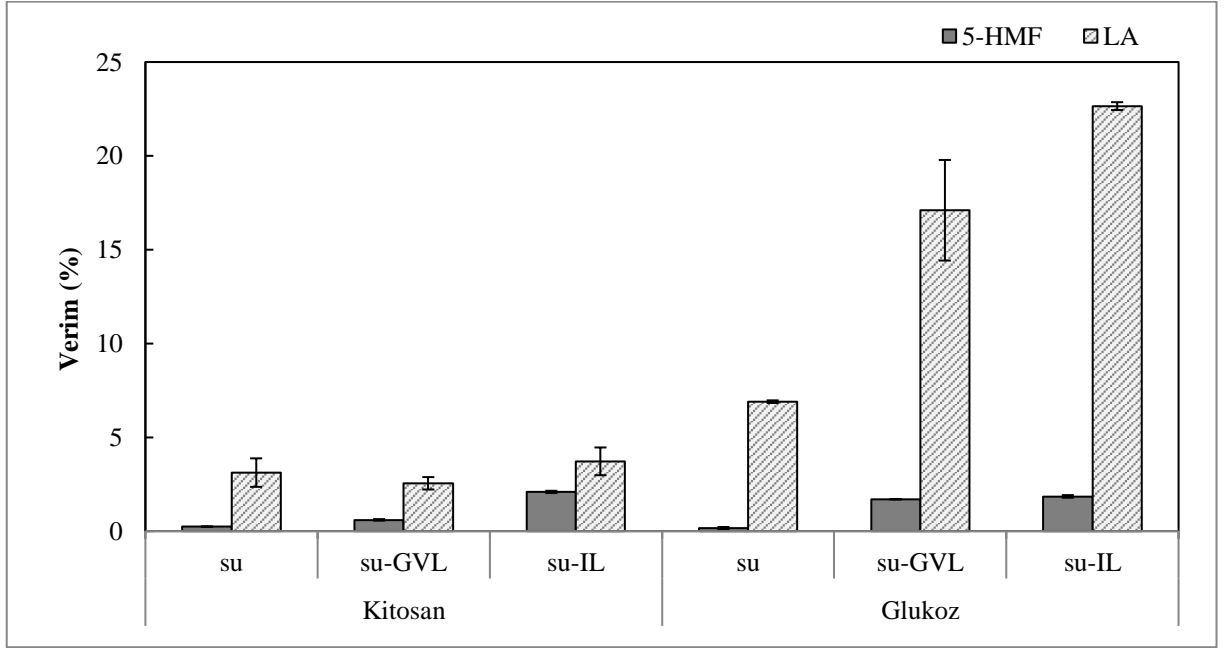
Kitosan ve glukozdan yalnız su, su/GVL ve su/[Bmim]HSO₄ çözücü ortamlarında tungstofosforik asit katalizörlüğünde elde edilen LA ve ara ürün 5-HMF miktarları Şekil 1’de, dönüşüm verimleri ise Şekil 2’de verilmiştir. Kitosanın katalitik dönüşümünde en etkili yardımcı çözücü [Bmim]HSO₄ olmuştur ve %3,7 verimle g kitosan başına 37,2 mg levulinik asit elde edilmiştir (Şekil 1.a ve 2). Kullanılan bu yardımcı çözücünün etkin olması kuvvetli Brønsted asit özelliğine sahip olması ile ilişkilendirilmektedir. Dönüşüm reaksiyonlarında Lewis asidi varlığının glukozun fruktoza izomerasyon reaksiyonlarını katalizlediği, Brønsted asidi varlığının ise homo/heteropolimerik (selüloz, kitosan vb.) yapının monoşekerlere hidrolizini ve oluşan monoşekerlerin (glukoz, fruktoz) dehidrasyon ile 5-HMF ye ve ardından LA’ya dönüşümünü katalizlediği bilinmektedir. Brønsted asit özelliğine sahip olduğu bilinen tungstofosforik asit ve iyonik sıvının ortamda birlikteliği sinerjik etki oluşturmaktadır. Literatürde yer alan benzer bir çalışmada [C₃SO₃Hmim]-katyonlu 6 farklı asidik iyonik sıvının sulu ortamda (kütlece 1:4 oranında) kitosandan levulinik asit eldesi üzerine etkisi incelenmiştir. 170°C’de 250 mg başlangıç maddesi ile en yüksek LA verimi (%49,0) [C₃SO₃Hmim]HSO₄, en düşük LA verimi ise (%8,5) [C₃SO₃Hmim]H₂PO₄ iyonik sıvısı ile elde edilmiştir. Bu dönüşümdeki yüksek verim, glukozidik oksijenin protonlanması ile kitosanın zincir bölünmesi reaksiyonuna asidik katalizin etkisine bağlanmıştır [2]. Ayrıca, konjuge baz yapısındaki anyon, yapıdaki hidroksil grupları ile hidrojen bağı yapma eğilimi ile polisakkarit yapısındaki molekül içi ve dışı hidrojen bağlarını, dolayısıyla da kristal yapıyı bozmaya başlar, bu da hidrolizi etkinleştirmektedir [14].



Şekil 1. Farklı çözücü ortamlarında elde edilen 5-HMF ve LA miktarları **a.** kitosan dönüşümü sonrası **b.** glukoz dönüşümü sonrası

Figure 1. The amount of 5-HMF ve LA obtained in different solvent mediums after **a.** chitosan conversion **b.** glucose conversion

Mısır samanı biyokütlesinin aynı sıcaklık ve süre koşullarında su-[Bmim]HSO₄ çözücü ortamında katalizörsüz dönüşümüne ait bir çalışmada ise g mısır samanı başına 32,2 mg levulinik asit ve 11,0 mg 5-HMF elde edilmiş olup burada katalizörün ortama ilavesiyle LA ve 5-HMF veriminin artacağı sonucuna varılmıştır [13]. Kitosan dönüşümünde yalnızca su ortamında tungstosforik asidin katalizör etkinliği incelenirse, katalizörsüz denemede LA oluşmazken, katalizörlü çalışmada LA miktarının g kitosan başına 31,2 mg' a çıktığı görülmektedir (Şekil 1.a).



Şekil 2. Farklı çözücü ortamlarında katalitik dönüşüm sonrası LA ve 5-HMF verimlerinin kıyaslanması
Figure 2. The comparison of LA ve 5-HMF yields in different solvent mediums after the catalytic conversion

Deneyler sonucunda hidrolizatların toplam indirgen şeker içerikleri kıyaslandığında (Çizelge 1) iyonik sıvı içeren ortamda kalan indirgen şeker miktarının yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum da yine iyonik sıvının hidrojen bağlarının kırılmasını sağlayarak kitosanın hidroliz oranını arttırdığının ve asidik karakteri ile katalizörün asidik özelliğini desteklediğinin göstergesidir [15].

Çizelge 1. Dönüşüm deneyleri sonrası çözeltilerdeki toplam indirgen şeker miktarlarının kıyaslanması

Table 1. Comparison of the total reducing sugar in the solutions after the conversion experiments

Çözücü	Toplam indirgen şeker (mg glukoz/g biyokütle)	
	Glukoz	Kitosan
su (katalizörsüz)	537,9 ± 17,2	13,3 ± 5,7
su	262,5 ± 15,8	30,0 ± 7,1
su/GVL	326,0 ± 117,8	36,5 ± 0,5
su/[Bmim]HSO ₄	181,9 ± 73,7	89,6 ± 5,8

Kitosanın katalitik dönüşümünde, polar aprotik yardımcı çözücü olarak GVL kullanıldığında yalnız su ortamına kıyasla 5-HMF miktarı artarken, LA miktarı dolayısıyla da LA verimi düşmüştür (Şekil 1.a ve 2). Selülozun hidrotermal hidrolizi üzerine yapılan bir çalışmada sulu ortamda GVL'nin aktivasyon enerjisini düşürdüğü, hem katı hem sıvı fazdaki hidroliz reaksiyonlarını arttırdığı belirtilmiştir. Organik faz varlığının suyun selüloz yüzeyindeki davranışını etkilediği ve hidroliz verimini arttıracak şekilde suyun glikozidik bağ oksijenleri ile daha kuvvetli hidrojen bağı yapmasını sağladığı söylenmektedir [16]. Bu çalışmada ise, GVL'nin asidik koşullarda kitosan dönüşümünde sulu ortamda hidroliz oranı ve ürün verimini artırma noktasında kayda değer bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. 5-HMF'nin rehidrasyonu yalnız su ortamındakine kıyasla daha yavaştır, bu durumun nedeni polar aprotik çözücü varlığında 5-HMF molekülünün su yerine GVL ile daha çok etkileşimi sonrası degradasyonunun baskılanması ile açıklanabilir [17]. Bu durumda farklı organik çözücü oranlarının denenmesinin verimi iyileştirmek açısından etkili olacağı düşünülmektedir. Yalnız su ve su/GVL ortamlarındaki dönüşümler sonrası hidroliz çözeltilerinde kalan toplam indirgen şeker miktarları da GVL'nin düşük aktivitesini destekler nitelikte birbirine çok yakındır (Çizelge 1).

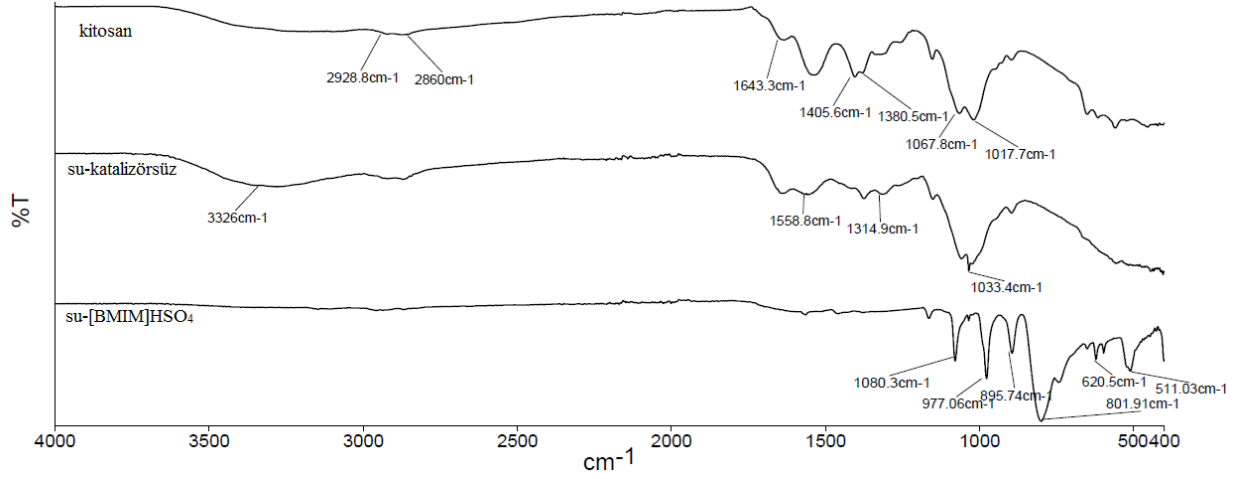
Glukozun katalitik dönüşümüne bakıldığında ise, %22,7 verim ve g başına 226,6 mg LA ile eldesi ile yine en etkili yardımcı çözücünün [Bmim]HSO₄ olduğu görülmektedir (Şekil 1.b). Tungstosforik asit katalizli reaksiyon sonunda ürün verimi artarken, hidroliz çözeltisinin toplam indirgen şeker miktarı yalnız suyun çözücü olarak kullanıldığı ortama göre %31,0 oranında azalmıştır. Glukoz dönüşümünde, katalizörlü sulu ortamda g glukoz başına 67,2 mg LA elde edilmiştir (Şekil 1.b). Kitosan ve glukoz hidrolizatlarının toplam indirgen şeker miktarlarına bakıldığında ise katalizör kullanılan sulu ortamdaki ürün (5-HMF ve LA) artışına paralel olarak bu değerlerin yarı-yarıya düştüğü görülmektedir (Çizelge 1).

Zhao ve diğerlerinin [18] heteropoliasit katalizörlüğünde iki fazlı çözücü ortamında kütlece %10'luk fruktoz çözeltisinin dönüşümünü inceledikleri çalışmada 115°C'de 1 saat reaksiyon süresi sonunda sırasıyla %71,4 ve %14,5 oranda 5-HMF ve LA verimi elde edilmiştir. Chang ve diğ. [19] tarafından yapılan benzer çalışmada silika destekli tungstosforik asidin yalnızca 1-etil-3-metilimidazolyum klorür ([Emim]Cl) iyonik sıvı ortamında glukozdan 5-HMF dönüşüm verimi incelenmiştir. 140°C'de 3 saat reaksiyon süresi sonunda daha düşük biyokütle/katalizör oranı ile (yaklaşık 1,4) %68,8 glukoz dönüşümü ve %74,7 5-HMF verimi elde edildiği belirtilmiştir. Çalışmada reaksiyon sıcaklığının düşük tutulması levulinik asidin oluşumundan ziyade daha çok glukozun dehidrasyonu ile 5-HMF oluşumunu destekleyecek niteliktedir. Ayrıca reaksiyon ortamının yalnızca iyonik sıvı kullanımı maliyet ve toksik etkiler düşünüldüğünde esasen bir dezavantaj olarak düşünülebilir. Silika destekli tungstosforik asidin katalizör olarak kullanıldığı farklı bir çalışmada ise N,N-dimetilformamid (DMF) ortamında glukoz dönüşümü katalizör etkisi ile %34,2 oranda artmış, 130°C'de 3 saat reaksiyon süresi sonunda %30,4 verimle glukozdan 5-HMF elde edilmiştir [20]. Metal organik kafes yapısı-bazlı tungstosforik asit katalizörü ile glukozdan levulinik asidin üretildiği bir çalışmada ise 150°C'de 9 saat reaksiyon süresi sonunda en yüksek %57,9 oranda LA verimine ulaşılabilmektedir [21].

Reaksiyon ortamında yalnız su yerine su/GVL kullanıldığında ise %17,1 verimle g başına 155,3 mg LA elde edilmiş, dolayısıyla LA miktarı sulu ortama kıyasla 2,3 katına çıkmıştır. Glukozun tungstosforik asit katalizörlü dönüşümünde sulu ortama hem GVL hem [Bmim]HSO₄ katkısı 5-HMF ve LA ürün verimini oldukça artırıcı yönde etki etmiştir.

3.2. Dönüşüm Prosesi Sonrası Hidroliz Olmayan Kitosan Katı Atığının Yapısal İncelemesi (Structural Investigation of Non-hydrolyzed Solid Waste of Chitosan After Conversion Process)

Kitosan dönüşüm deneyleri sonrasında katalizörsüz sulu ortamda ve katalizörlü iyonik sıvı-su ortamında elde edilen katı atığın yapısal değişikliklerini gözleyebilmek için FT-IR spektrumları kıyaslanmıştır (Şekil 3). Spektrumda 3400 cm⁻¹'de gözlenen geniş bant kitosan yapısında bulunan N-H ve O-H gruplarına ait gerilme titreşimlerini göstermektedir. 2925 cm⁻¹ ve 2869 cm⁻¹ pikleri karakteristik C-H gerilme titreşimleri, 1381 cm⁻¹ piki ise C-H eğilme titreşimlerine aittir. 1643, 1556 ve 1318 cm⁻¹ pikleri amit bağlarına karşılık gelmekte ve kısmi deasetilasyondan kaynaklanmaktadır [22], [23]. 1093–894 cm⁻¹ aralığındaki bantlar ise piranoz ünitelerine karşılık gelmektedir [21]. Bu piklere su-iyonik sıvı ortamından alınan katıda rastlanmaması kuvvetli asidik koşullarda tamamen hidroliz olduklarını göstermektedir. Kuvvetli asidik ortamda hidrojen bağı oluşumu da bozulmuştur. Su-[Bmim]HSO₄ ortamında gözlenen 1080, 983, 888 ve 805 cm⁻¹ bantları katı üzerinde kalan katalizörün Keggin yapısına ait karakteristik bantlardır [24]. Katalizörsüz hidrotermal işlem sonrası orijinal kitosan ana yapısının korunduğu sonuçlardan görülmektedir.



Şekil 3. Dönüşüm sonrası kitosan katı atığının FT-IR spektrumu

Figure 3. FT-IR spectra of chitosan solid waste after conversion

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmada bir heteropoliasit olan tungstofosforik asidin sulu ortamda kitosan hidrolizi ve levulinik asit verimini arttıran bir katalizör olma özelliği taşıdığı gözlenmiştir. Reaksiyon ortamında su ile birlikte yardımcı çözücü olarak kullanılan iyonik sıvının, asidik özelliği sayesinde kitosan ve glukozdan levulinik asit eldesi verimini arttırdığı, organik çözücünün ise yalnızca glukoz dönüşüm verimini arttırdığı görülmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda levulinik asidin petrokimyasal hammaddeler yerine yenilenebilir, karbonhidratlar açısından zengin, atık biyokütle materyallerinden üretimine odaklanılmıştır. Bu çalışmada, biyokütle materyali olarak kitosan ve model bileşik glukozun tek basamakta hidrolizi ve levulinik aside dönüşümü prosesinde katalizör ve çözücü ortamı etkinliği ile ilgili elde edilen bu sonuçlar sonraki çalışmalar için literatüre katkı sağlayacaktır.

5. SEMBOLLER (SYMBOLS)

GVL: γ -Valerolakton

IL: İyonik sıvı

5-HMF: 5-hidroksimetilfurfural

LA: Levulinik asit

[Bmim]HSO₄ : 1-bütül-3-metilimidazolyum hidrojen sülfat

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Çalışma etik standartlara uygun olarak yürütülmüştür.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Şeyma ÖZDEMİR : Deneysel veri toplama, araştırma, analizler

Berna NİŞ: Araştırma, analizler, makalenin gözden geçirilmesi-düzenlenmesi.

Burçak KAYA ÖZSEL: Araştırma, deneysel çalışmanın tasarlanması, sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, makaleninin yazım-gözden geçirme-düzenleme ve revizyonu.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Tüm yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)


Makalede kullanılan veriler paylaşımına açık değildir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Morone, M. Apte, and R. A. Pandey, "Levulinic acid production from renewable waste resources: Bottlenecks, potential remedies, advancements and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 548-565, 2015.
- [2] W. Hou, L. Liu, and H. Shen, "Selective conversion of chitosan to levulinic acid catalysed by acidic ionic liquid: Intriguing NH₂ effect in comparison with cellulose," *Carbohydrate Polymers*, vol. 195, pp. 267-274, 2018.
- [3] J. A. Dumesic, D. Martin Alonso, and J. S. Luterbacher, "Biomass pre-treatment for co-production of high-concentration C5- and C6-carbohydrates and their derivatives," U.S. Patent 9,359,650, June, 2016.
- [4] H. Q. Lê, H. Sixta, and M. Hummel, "Ionic liquids and gamma-valerolactone as case studies for green solvents in the deconstruction and refining of biomass," *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 18, pp. 20-24, 2019.
- [5] X. Li, Q. Liu, C. Luo, X. Gu, L. Lu, and X. Lu, "Kinetics of Furfural Production from Corn Cob in γ -Valerolactone Using Dilute Sulfuric Acid as Catalyst," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 5, no. 10, pp. 8587-8593, 2017.
- [6] F. Huang, W. Li, Q. Liu, T. Zhang, S. An, D. Li, and X. Zhu, "Sulfonated tobacco stem carbon as efficient catalyst for dehydration of C6 carbohydrate to 5-hydroxymethylfurfural in γ -valerolactone/water," *Fuel Processing Technology*, vol. 181, pp. 294-303, 2018.
- [7] S. G. Wettstein, D. M. Alonso, Y. Chong, and J. A. Dumesic, "Production of levulinic acid and gamma-valerolactone (GVL) from cellulose using GVL as a solvent in biphasic systems," *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 8, pp. 8199-8203, 2012.
- [8] M. R. Park, H. S. Kim, S. K. Kim, and G. T. Jeong, "Thermo-chemical conversion for production of levulinic and formic acids from glucosamine," *Fuel Processing Technology*, vol. 172, pp. 115-124, 2018.
- [9] T. Zhang, W. Li, S. An, F. Huang, X. Li, J. Liu, G. Pei, and Q. Liu, "Efficient transformation of corn stover to furfural using p-hydroxybenzenesulfonic acid-formaldehyde resin solid acid," *Bioresource Technology*, vol. 264, pp. 261-267, 2018.
- [10] J. X. Feng, H. J. Zang, Q. Yan, M. G. Li, and B. W. Cheng, "Conversion of Chitosan into 5-Hydroxymethylfurfural via Hydrothermal Synthesis," *Advance Material Research*, vol. 1095, pp. 411-414, 2015.
- [11] X. Li, X. Lu, S. Nie, M. Liang, Z. Yu, B. Duan, J. Yang, R. Xu, L. Lu, and C. Si, "Efficient catalytic production of biomass-derived levulinic acid over phosphotungstic acid in deep eutectic solvent," *Industrial Crops and Products*, vol. 145, p. 112154, 2020.
- [12] A. Nayak, I. N. Pulidindi, and C. S. Rao, "Novel strategies for glucose production from biomass using heteropoly acid catalyst," *Renewable Energy*, vol. 159, pp. 215-220, 2020.
- [13] B. Nis and B. Kaya Ozsel, "Efficient direct conversion of lignocellulosic biomass into biobased platform chemicals in ionic liquid-water medium," *Renewable Energy*, vol. 169, pp. 1051-1057, 2021.
- [14] Y. Jiang, H. Zang, S. Han, B. Yan, S. Yu, and B. Cheng, "Direct conversion of chitosan to 5-hydroxymethylfurfural in water using Brønsted-Lewis acidic ionic liquids as catalysts," *RSC Advance*, vol. 6, no. 105, pp. 103774-103781, 2016.

- [15] F. W. Low, N.A. Samsudin, Y. Yusoff, X. Y. Tan, C. W. Lai, N. Amin, and S. K. Tiong, "Hydrolytic cleavage of glycosidic bonds for cellulose nanoparticles (CNPs) production by BmimHSO₄ ionic liquid catalyst," *Thermochimica Acta*, vol. 684, p. 178484, 2020.
- [16] B. Song, Y. Yu, and H. Wu, "Solvent effect of gamma-valerolactone (GVL) on cellulose and biomass hydrolysis in hot-compressed GVL/water mixtures," *Fuel*, vol. 232, pp. 317-322, 2018.
- [17] S. S. Chen, I. K. M. Yu, D. C. W. Tsang, A. C. K. Yip, E. Khan, L. Wang, Y. S. Ok, and C. S. Poon, "Valorization of cellulosic food waste into levulinic acid catalyzed by heterogeneous Brønsted acids: Temperature and solvent effects," *Chemical Engineering Journal*, vol. 327, pp. 328-335, 2017.
- [18] Q. Zhao, L. Wang, S. Zhao, X. Wang, and S. Wang, "High selective production of 5-hydroxymethylfurfural from fructose by a solid heteropolyacid catalyst," *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2289-2293, 2011.
- [19] K. L. Chang, Q. T. Huynh, C. T. Zhong, W. R. Chen, H. Y. Wang, P. Phitsuwan, Y. C. Lin, and G. C. C. Yang, "Production of 5-hydroxymethylfurfural from glucose by recyclable heteropolyacid catalyst in ionic liquid," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 28, p. 102844, 2022.
- [20] Y. Wang, Z. Hu, G. Fan, J. Yan, G. Song, and J. Li, "Catalytic Conversion of Glucose to 5-(Hydroxymethyl)furfural Over Phosphotungstic Acid Supported on SiO₂-Coated Fe₃O₄," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, pp. 2263-2271, 2019.
- [21] H. Qu, B. Liu, G. Gao, Y. Ma, Y. Zhou, H. Zhou, L. Li, Y. Li, and S. Liu, "Metal-organic framework containing Brønsted acidity and Lewis acidity for efficient conversion glucose to levulinic acid," *Fuel Processing Technology*, vol. 193, pp. 1-6, 2019.
- [22] M. Li, H. Zang, J. Feng, Q. Yan, N. Yu, X. Shi, and B. Cheng, "Efficient conversion of chitosan into 5-hydroxymethylfurfural via hydrothermal synthesis in ionic liquids aqueous solution," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 121, pp. 331-339, 2015.
- [23] E. Stodolak-Zych, P. Jeleń, E. Dzierzkowska, M. Krok-Borkowicz, Ł. Zych, M. Boguń, A. Rapacz-Kmita, and B. Kolesińska, "Modification of chitosan fibers with short peptides as a model of synthetic extracellular matrix," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1211, p. 128061, 2020.
- [24] R. Tan, C. Liu, N. Feng, J. Xiao, W. Zheng, A. Zheng, and D. Yin, "Phosphotungstic acid loaded on hydrophilic ionic liquid modified SBA-15 for selective oxidation of alcohols with aqueous H₂O₂," *Microporous Mesoporous Materials*, vol. 158, pp. 77-87, 2012.

Ni₂ZnAl ALAŞIMININ İLK PRENSİPLER YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

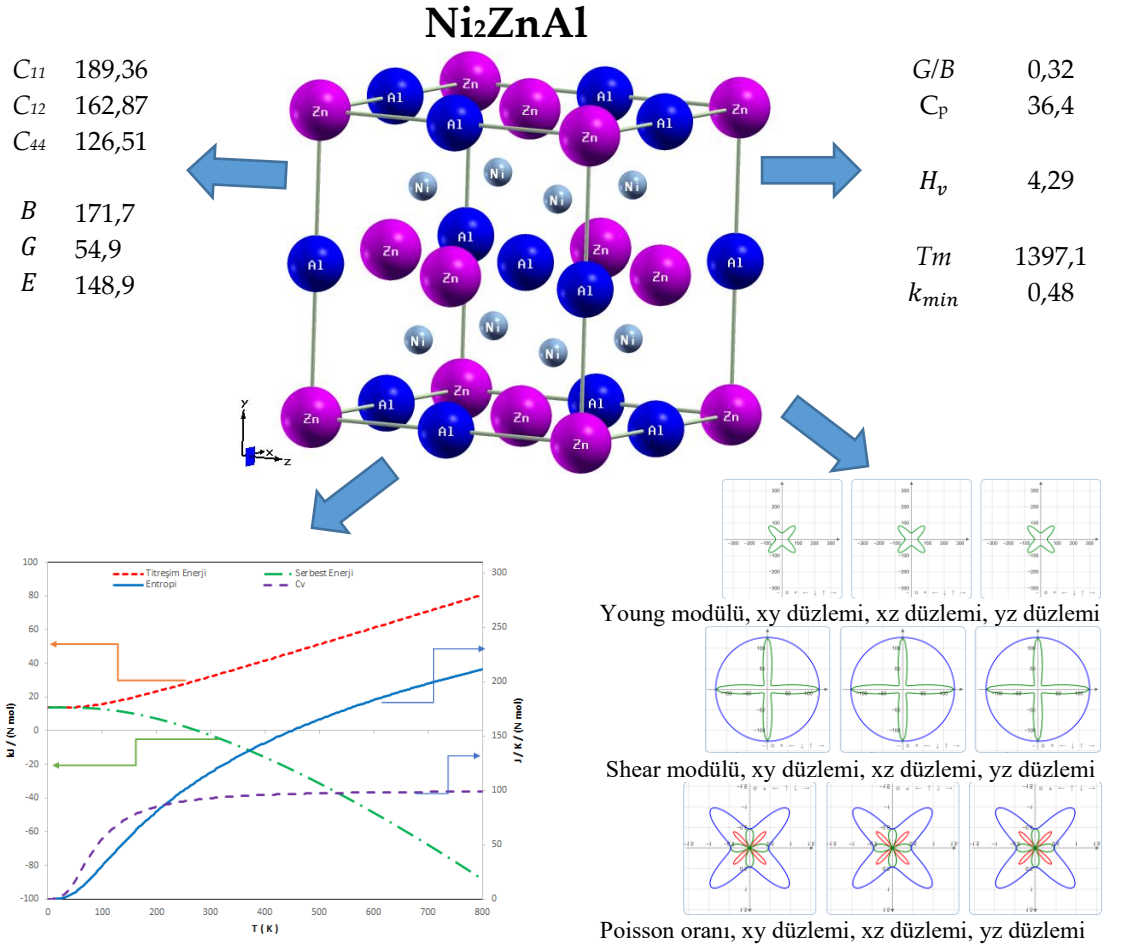
*Tahsin ÖZER 

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Osmaniye, TÜRKİYE
tahsinozer@osmaniye.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Ni₂ZnAl'nin yapısal, mekanik ve termodinamik özelliklerini sunuyoruz.
- Ortam basıncında mekanik olarak kararlıdır.
- Sünek, yumuşak ve anizotropik bir yapıya sahiptir.

Grafik Özet (Graphical Abstract)





Ni₂ZnAl ALAŞIMININ İLK PRENSİPLER YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

*Tahsin ÖZER

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Osmaniye, TÜRKİYE
tahsinozer@osmaniye.edu.tr

(Geliş/Received: 06.09.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.02.2023)

ÖZ: Bu çalışmada, Heusler ailesinden L₂₁ fazında Ni₂ZnAl alaşımının temel durumdaki yapısal parametreleri optimize edildi. Hesaplanan örgü parametresi ulaşılabilen literatür verisi ile uyum içerisindedir. Optimize parametreler kullanılarak elastik sabitleri hesaplandı. Hesaplanan elastik sabitlerinin Born mekanik kararlılık kriterlerini karşıladığı görüldü. Bu sabitler kullanılarak malzemenin elastik modülü, Vicker sertliği, anizotropik doğası, erime sıcaklığı gibi bir takım mekanik ve termodinamik özellikleri detaylı olarak araştırıldı. Hesaplamalar Ni₂ZnAl alaşımının, sünek, yumuşak ve anizotropik olduğunu gösterdi. Bu hali ile sertlik gerektirmeyen uygulamalar için aday malzemedir. Ni₂ZnAl alaşımının serbest enerjisi, titreşim enerjisi, entropisi ve ısı sıçası 0-800 K aralığında yarı harmonik yaklaşım kullanılarak incelendi. Toplam enerji hesaplamalarının tamamı açık kaynak kodlu Quantum Espresso yazılımı ve GGA dikkate alınarak ilk prensipler psödo potansiyel yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, Ni₂ZnAl alaşımı endüstriyel kullanım için potansiyel bir adaydır.

Anahtar Kelimeler: Ni₂ZnAl, Heusler, Mekanik Özellikler, Termodinamik Özellikler

Examination of The Ni₂ZnAl Alloy by First Principles Method

ABSTRACT: In this study, ground state properties of Ni₂ZnAl alloy in L₂₁ phase from Heusler family were optimized. The calculated parameters are in harmony with the available literature data. Elastic constants were calculated using optimized parameters. The calculated elastic constants were found to meet the Born mechanical stability criteria. By using these constants, some mechanical and thermodynamic properties of the material such as elastic modulus, Vicker hardness, anisotropic nature, melting temperature were investigated in detail. Calculations showed that the Ni₂ZnAl alloy is ductile, soft, and anisotropic. As such, it is a candidate material for applications that do not require hardness. The free energy, vibrational energy, entropy, and heat capacity of the Ni₂ZnAl alloy were investigated using a semi-harmonic approach in the range of 0-800 K. All the total energy calculations were performed using the open-source Quantum Espresso software and ab-initio pseudopotential method based on the density functional theory (DFT) scheme within a generalized gradient approximation (GGA). According to the data obtained because of the study, Ni₂ZnAl alloy is a potential candidate for industrial use.

Keywords: Ni₂ZnAl, Heusler, Mechanical Properties, Thermodynamic Properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Heusler bileşikler üçlü inter metalik, yüz merkezli kübik kristallerdir (FCC). Kimyasal formülleri genellikle yarı Heusler için XYZ, tam Heusler için X₂YZ şeklindedir. Burada X ve Y geçiş metalleri, Z ise ana grup elementidir. X₂YZ formunda genel olarak, Co₂FeSi bileşiğinde olduğu gibi, iki kere tekrarlayan element formülün başına ana grup elementi de sonuna yazılır. İstisnai olarak LiCu₂Sb bileşiğinde olduğu gibi bir element kesin olarak en elektro pozitif olarak tanımlanabiliyorsa bu element bir kere tekrarlamasına rağmen formülün başına konulur. XYZ formunda, MnNiSb örneğindeki gibi en

*Corresponding Author: Tahsin ÖZER, tahsinozer@osmaniye.edu.tr

elektropozitif element formülün başına konulur. Heusler bileşiklerinin mümkün olan kombinasyonlarının genel bir görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi sayısız Heusler bileşik vardır/tasarlanabilir. Sayısız üyesi ile Heusler ailesi, ferro manyetiklerden manyetik olmayan yarı iletkenlerden, süper iletkenlere ve topolojik yalıtkanlara kadar geniş bir yelpazede istenen özelliklere sahip malzeme tasarım seçeneği sunmaktadır [1]. Valans elektron sayılarına bakılarak da birçok Heusler bileşiklerinin özellikleri tahmin edilebilmektedir. Örneğin 27 valans elektronu ile manyetik olmayan Heusler bileşikler süper iletkenlerdir. Kimyasal kompozisyonlarının değişimi ile band boşlukları sıfır ile yaklaşık 4 eV aralığında ayarlanabilmektedir. Bundan dolayı hem güneş pili hem de termoelektrik uygulamalar için potansiyel malzemeler olarak dikkat çekmektedir. Üçlü bileşiklerde iki veya daha fazla özelliğin birleşmesi ile çok fonksiyonel tasarımı mümkündür [2].

ATOMIC NUMBER		SYMBOL		ELECTRONEGATIVITY	
1	H	29	Cu	1.90	
2	He				
3	Li	4	Be	0.98	1.57
5	B	6	C	2.04	2.55
7	N	8	O	3.04	3.44
9	F	10	Ne	3.98	
11	Na	12	Mg	0.93	1.31
13	Al	14	Si	1.61	1.90
15	P	16	S	2.19	2.58
17	Cl	18	Ar	3.16	
19	K	20	Ca	0.82	1.00
21	Sc	22	Ti	1.36	1.54
23	V	24	Cr	1.63	1.66
25	Mn	26	Fe	1.55	1.83
27	Co	28	Ni	1.88	1.91
29	Cu	30	Zn	1.90	1.65
31	Ga	32	Ge	1.81	2.01
33	As	34	Se	2.18	2.55
35	Br	36	Kr	2.96	3.00
37	Rb	38	Sr	0.82	0.95
39	Y	40	Zr	1.22	1.33
41	Nb	42	Mo	1.60	1.60
43	Te	44	Ru	1.90	2.20
45	Rh	46	Pd	2.28	2.20
47	Ag	48	Cd	1.93	1.69
49	In	50	Sn	1.78	1.96
51	Sb	52	Te	2.05	2.10
53	I	54	Xe	2.66	2.60
55	Cs	56	Ba	0.79	0.89
57-71	LANTHANIDE	72	Hf	1.30	1.50
73	Ta	74	W	1.50	1.70
75	Re	76	Os	1.90	2.20
77	Ir	78	Pt	2.20	2.20
79	Au	80	Hg	2.40	1.90
81	Tl	82	Pb	1.80	1.80
83	Bi	84	Po	1.90	2.00
85	At	86	Rn	2.00	2.20
87	Fr	88	Ra	0.70	0.90
89-103	ACTINIDE				
57	La	58	Ce	1.10	1.12
59	Pr	60	Nd	1.13	1.14
61	Pm	62	Sm	1.13	1.17
63	Eu	64	Gd	1.20	1.20
65	Tb	66	Dy	1.10	1.22
67	Ho	68	Er	1.23	1.24
69	Tm	70	Yb	1.25	1.10
71	Lu				1.27
89	Ac	90	Th	1.10	1.30
91	Pa	92	U	1.50	1.70
93	Np	94	Pu	1.30	1.28
95	Am	96	Cm	1.28	1.13
97	Bk	98	Cf	1.30	1.30
99	Es	100	Fm	1.30	1.30
101	Md	102	No	1.30	1.30
103	Lr				1.30

Şekil 1. Heusler bileşikler [1]

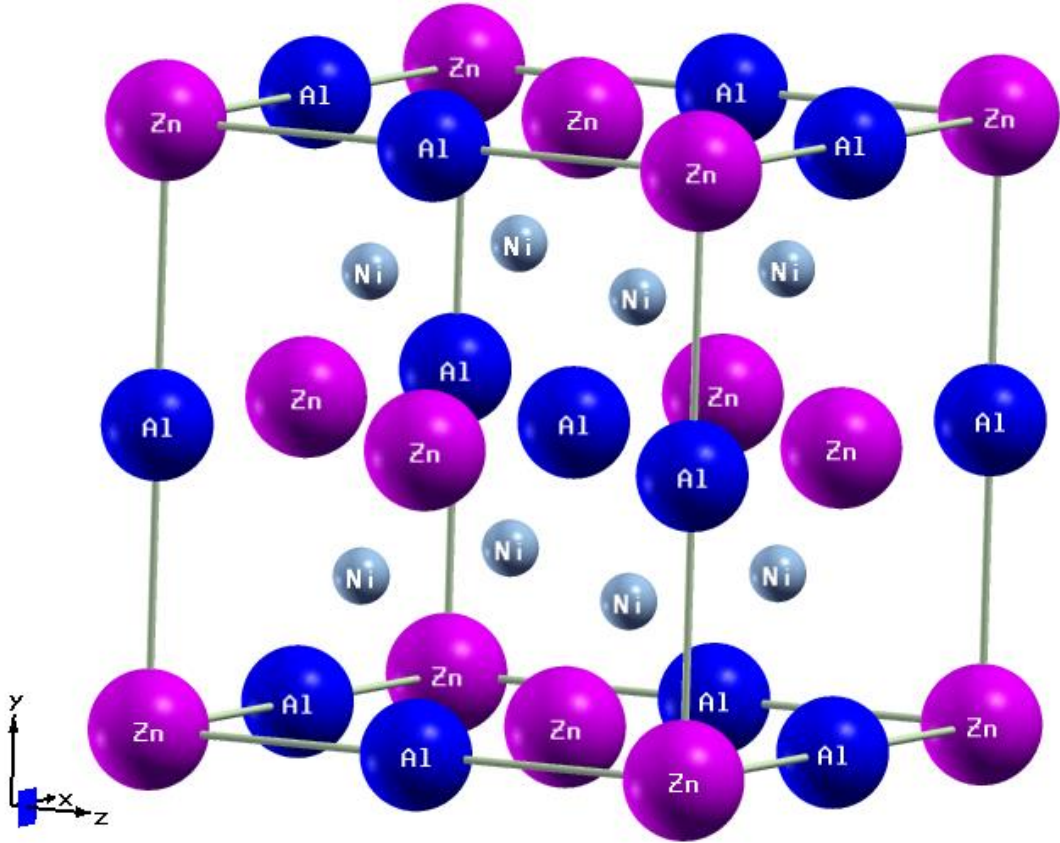
Figure 1. Heusler compounds (Bai et al. 2012)

Heusler bileşikler, 1903 yılında Fritz Heusler tarafından keşfinden bu yana bir asırdan daha fazla zaman geçmesine rağmen, sahip oldukları üstün özelliklerden dolayı hala aktif bir çalışma konusudur [3]. Bir seri Heusler alaşımının oluşum entalpisi ve örgü sabiti Gilleßen (2009) tarafından belirlenmiştir. Söz konusu çalışmada Ni_2ZnAl alaşımının oluşum entalpisi $-178,7$ kJ/mol [4] olduğu rapor edilmiştir. Rapor edilen bu sonuca göre Ni_2ZnAl alaşımı deneysel olarak sentezlenebilir.

Gelişen bilgisayar teknolojisinin hesaplama gücü araştırmalarda kullanılarak sentezlenen veya henüz sentezlenmemiş malzemelerin özellikleri gerçeğe çok yakın bir değerde teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bu teorik çalışmalar malzeme ve zaman israfının da önüne geçebilmektedir. Böylece istenen özellikte malzemeler ile çalışılarak/kullanılarak amaçlanan uygulamalara malzeme tasarımı yapılabilmektedir. Bir malzeme hakkında yeteri kadar bilgi elde edilip uygulama safhasına gelindiğinde mekanik özellikleri önem arz etmektedir. Yapılan literatür taramasında Ni_2ZnAl alaşımının mekanik özelliklerine rastlayamadık. Bu anlamda Ni_2ZnAl alaşımı ilk defa çalışılacaktır. Teknolojik öneme haiz Heusler ailesinden olan Ni_2ZnAl alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri araştırılarak literatüre katkı yapılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL-METOT (MATERIAL-METHOD)

Kübik yapıda, $Fm-3m$ (no:225) uzay grubunda ve $L2_1$ fazında çalışılan Ni_2ZnAl alaşımının optimizasyon parametreleri kullanılarak, XCrySDen yazılımı [5] ile görselleştirilen birim hücresi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ni₂ZnAl alaşımasının birim hücresi

Figure 2. Unit cell of Ni₂ZnAl compound

Ni₂ZnAl alaşımı için yapılan tüm hesaplamalarda Quantum-Espresso (QE) [6] internet sitesinde bulunan psödo potansiyellerden USPP (Ultra Soft Pseudo Potansiye) tipi PBESOL fonksiyonel dosyalar ve Genelleştirilmiş Gradyent Yaklaşımı (GGA) tercih edilmiştir. Yapısal optimizasyondan önce hesaplamalarda kullanılan kesilim enerjisi ($E_{cut} = 160 \text{ Ry}$), yük yoğunluğu ($E_{cutRho} = 1120 \text{ Ry}$), smearing parametresi (0,01) ve k-noktaları ($13 \times 13 \times 13$) optimize edilmiştir. Akabinde bu optimize parametreler kullanılarak yapısal optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Geometri optimizasyonunda BFGS algoritması kullanılmıştır. Smearing parametresinde methfessel-paxton (mp) metodu [7] tercih edilmiştir. Elastik sabitler, hacim korunumlu zorlamanın (volume-conserving metot) bir fonksiyonu olarak toplam enerji hesaplamalarından yararlanılarak belirlenmiştir [8], [9].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Açık kaynak QE yazılımı kullanılarak Ni₂ZnAl alaşımasının optimize parametrelerle hesaplanan örgü sabiti $5,71 \text{ \AA}$. Literatür taramasından, The Open Quantum Database (OQMD) internet sitesinde $5,751 \text{ \AA}$ [10], [11], Gilleßen (2009) tarafından yapılan çalışmada örgü sabiti $5,788 \text{ \AA}$ [4] rapor edilmiştir. OQMD rapor edilen veri ile kıyas yapıldığında elde edilen sonucun %0,8 farklı olduğu görülmektedir. Bu hali ile oldukça tutarlıdır. Ni₂ZnAl alaşımasının yapısal optimizasyonu gerçekleştirildikten sonra, optimize değerler kullanılarak QE yazılım paketi ile dağıtımı yapılan THERMO_PW scripti ile alaşımın elastik sabitleri hesaplanmıştır (Çizelge 1). Bu çalışma ile bulunan değerlerin kıyaslanabileceği bir veriye ulaşılamadığından Fm-3m uzay grubu ve L₂₁ fazında Co₂ScAl [12] ve Rh₂FeAl [13] bileşikleri için ulaşılan sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Kübik yapıdaki bir kristalin elastik sabitleri C_{11} , C_{12} ve C_{44} olarak sembolize edilen üç bağımsız değeri vardır. Bu elastik sabitlerin değerlerine bakılarak malzemenin mekanik olarak karlı/kararsız olduğu, eğer

mekanik olarak kararlı ise elastik modülleri, karakteristik Debye sıcaklığı, anizotropi, minimum termal iletkenlik, erime noktası gibi bir takım fiziksel özellikleri incelenebilmektedir. Bir kristalin mekanik olarak kararlı olabilmesi için,

$$C_{11} > 0, C_{44} > 0, C_{11} > |C_{12}|, (C_{11} + 2C_{12}) > 0 \quad (1)$$

kararlılık kriterleri olarak bilinen bu şartları sağlaması gerekmektedir [14], [15]. C_{11} elastik sabiti eksenler boyunca sıkışma direncini, C_{44} ise malzemenin sertliğini yöneten önemli bir parametredir [16]. Çalışılan bileşik, Eşitlik 1’de verilen şartları sağladığı için mekanik olarak kararlı olduğu söylenebilir. Ni_2ZnAl alaşımı mekanik olarak kararlı olduğu için bulk, shear ve Young modülleri hesaplanmıştır (Çizelge 1). Hesaplama kullanılan eşitlikler;

Bulk modül,

$$B_V = B_R = (C_{11} + 2C_{12})/3 \quad (2)$$

Shear modül,

$$G_V = \frac{C_{11}-C_{12}+3C_{44}}{5} \quad G_R = \frac{5(C_{11}-C_{12})C_{44}}{4C_{44}+3(C_{11}-C_{12})} \quad G = \frac{G_R+G_V}{2} \quad (3)$$

Young modül,

$$E = 9BG/(3B + G) \quad (4)$$

Modüllerin hesabında kullanılan eşitliklerde geçen alt indislerden “R” Reuss, “V” Voight yaklaşımını göstermektedir. R ve V’nin aritmetik ortalaması olan Hill yaklaşımı, deneysel değerlere en yakın sonucu vermektedir. Hill yaklaşımında herhangi bir alt indis kullanılmamıştır.

Çizelge 1. Hesaplanan elastik sabitler ve elastik modül değerleri

Table 1. Calculated elastic constants and elastic modulus values

Ref.	Elastik Sabitler (GPa)					Elastik Modül (GPa)				
	C_{11}	C_{12}	C_{44}	B	G_V	G_R	G	E_V	E_R	E
Bu çalışma	189,36	162,87	126,51	171,7	81,2	28,62	54,9	210,4	81,34	148,9
Co ₂ ScAl	180,16	162,26	150,86	168,2	94,1 ^a	20,5 ^a	57,3 ^a	237,9 ^a	59,2 ^a	154,4
Rh ₂ FeAl	258,02	168,24	127,26	198,2	94,3	73,39	83,9	244,2 ^a	196,0 ^a	220,5

^a Literatürden alınan elastik sabitlerden hesaplandı.

B (171,7), G (54,91) ve E (148,86) değerleri malzemenin sertlik/rijitliğini tahmin etmektedir. Bu değerlerin büyüklüğü malzemenin sertliğine işaret etmektedir. Büyüklük görel olduğundan malzemenin sertliğini daha belirgin olarak ifade edebilmek için Vicker sertliği hesaplandı. Bir malzemenin Vicker sertliğini B , G ve E değerlerinden tahmin eden ampirik bağıntılar literatürde mevcuttur. Bunlardan Tian ve diğ. (2012) önerdiği eşitlik [17],

$$H_v = 0,92 k^{1,137} G^{0,708} \quad (5)$$

Verilen bu eşitlik kullanılarak Ni_2ZnAl alaşımının Vicker sertliği 4,29 GPa olarak hesaplanmıştır. Co₂ScAl ve Rh₂FeAl alaşımları için hesaplanan ortalama Vicker sertlik değerleri sıra ile 4,55 ve 8,36 GPa’dır. Hesaplanan bu sonuçlara göre Ni_2ZnAl alaşımı Co₂ScAl ayarında bir sertliğe sahiptir. Literatürde Vicker sertlik değerine göre malzemeler, yumuşak, yumuşak olmayan ve sert malzeme olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre Vicker sertlik değeri 10 GPa’dan küçük malzemeler yumuşak malzeme sınıfına

girmektedir[18]. Bu sonuca göre Ni₂ZnAl, Co₂ScAl ve Rh₂FeAl alaşımlarının Vicker sertlik değerlerinin 10 GPa'dan küçük olmasından dolayı yumuşak malzeme kategorisine girdiği söylenebilir.

Malzeme bilimi ve mühendisliğinde bir malzemenin sünek (ductile) veya kırılğan (brittle) özellik gösterdiğinin/göstereceğinin bilinmesi önem arz etmektedir. Bu bakımdan Ni₂ZnAl alaşımının kırılğan/sünek doğası da analiz edilmiştir. Bir malzemenin G/B oranı 0,5'ten küçük ise sünek aksi halde kırılğan davranış sergiler[14]. Poisson oranı için kritik değer 0,26'dır[14]. Cauchy basıncında ($C_p=C_{12}-C_{44}$)[19] ise pozitif/negatifliğine bakılır. Eğer pozitif ise sünek olduğu söylenir. Yapılan hesaplamalar sonucunda Ni₂ZnAl, Co₂ScAl ve Rh₂FeAl alaşımları için elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2'den de görüleceği üzere her üç alaşımın G/B oranı 0,5'ten küçük Poisson oranı 0,26'dan büyük ve Cauchy basıncı pozitif olduğundan sünek karaktere sahiptirler. G/B oranı, Poisson oranı ve Cauchy basıncı ile ulaşılan yargı kendi aralarında tutarlıdır. Bu tutarlılık hesaplamaların güvenilirliğini arttırmaktadır.

Çizelge 2. Hesaplanan elastik sabitlerden hesaplanan G/B ve Poisson oranı, Cauchy basıncı

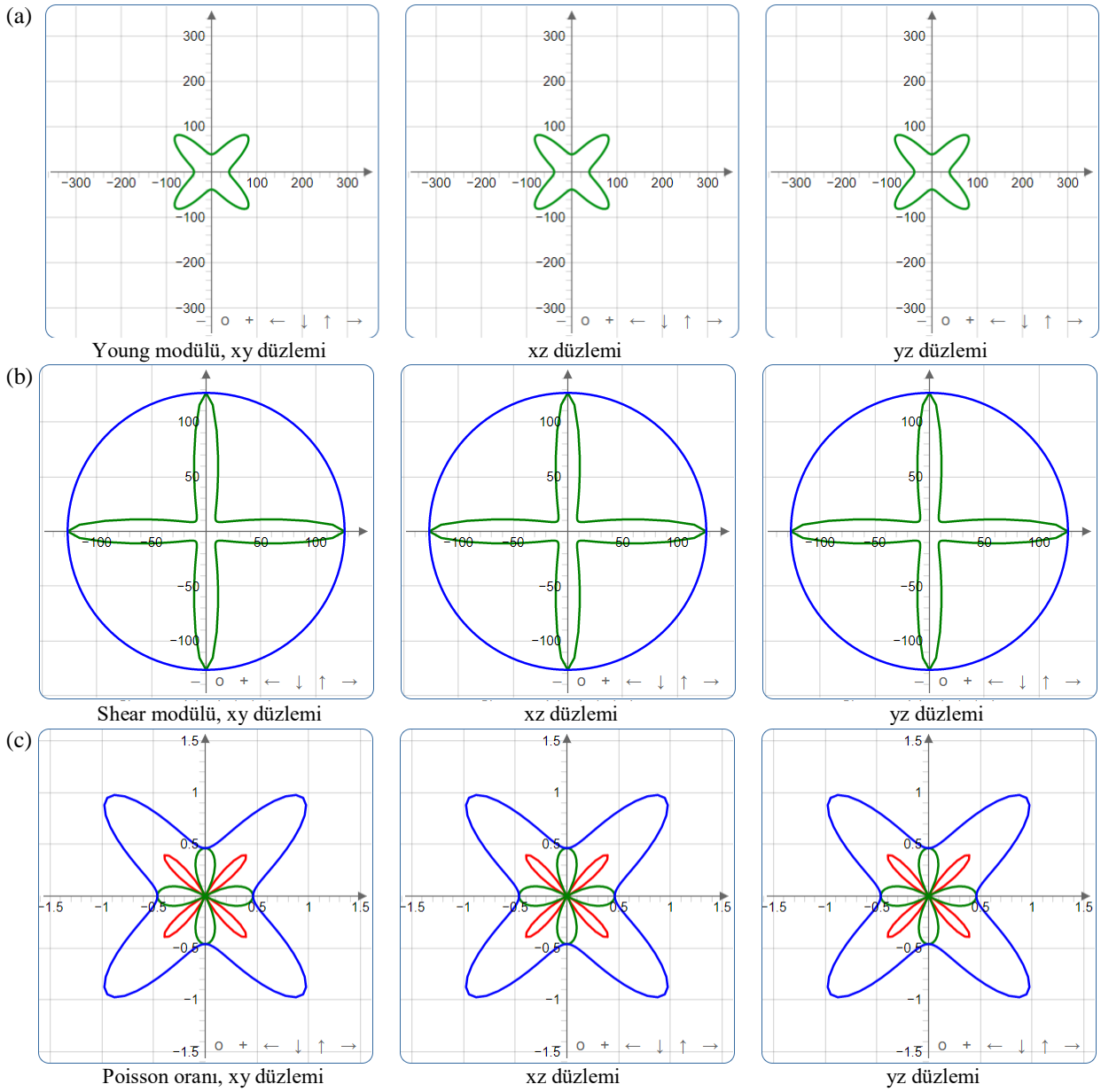
Table 2. G/B and Poisson ratio, and Cauchy pressure calculated from the elastic constants.

Ref.	G/B	Poisson oranı	Cauchy basıncı	Karakter
Bu çalışma	0,32	0,36	36,4	Sünek
Co ₂ ScAl ^a	0,34	0,35	11,4	Sünek
Rh ₂ FeAl ^a	0,42	0,32	41,0	Sünek

^a Literatürden alınan elastik sabitlerden hesaplandı.

Poisson oranı malzemenin sünek/kırılğan doğası hakkında bilgi vermekle aynı zamanda etkili olan bağ kuvvetleri ve atomik bağlanma hakkında da bilgi vermektedir. Eğer Poisson oranı 0,25-0,50 aralığında ise merkezi kuvvetlerin etkili olduğu söylenir. Buna göre Poisson oranı bu limitler dahilinde olduğundan Ni₂ZnAl, Co₂ScAl ve Rh₂FeAl alaşımlarında merkezi kuvvetler etkindir. Hesaplanan Poisson oranı malzemenin kovalent/iyonik karakteri hakkında da bilgi vermektedir. Poisson oranı 0,1'e yakın ise kovalent, 0,25'e yakınsa iyonik, 0,33 ise metalik malzemedir [15], [20]. Hesaplanan Poisson oranına bakılarak metalik karakterde oldukları söylenilebilir.

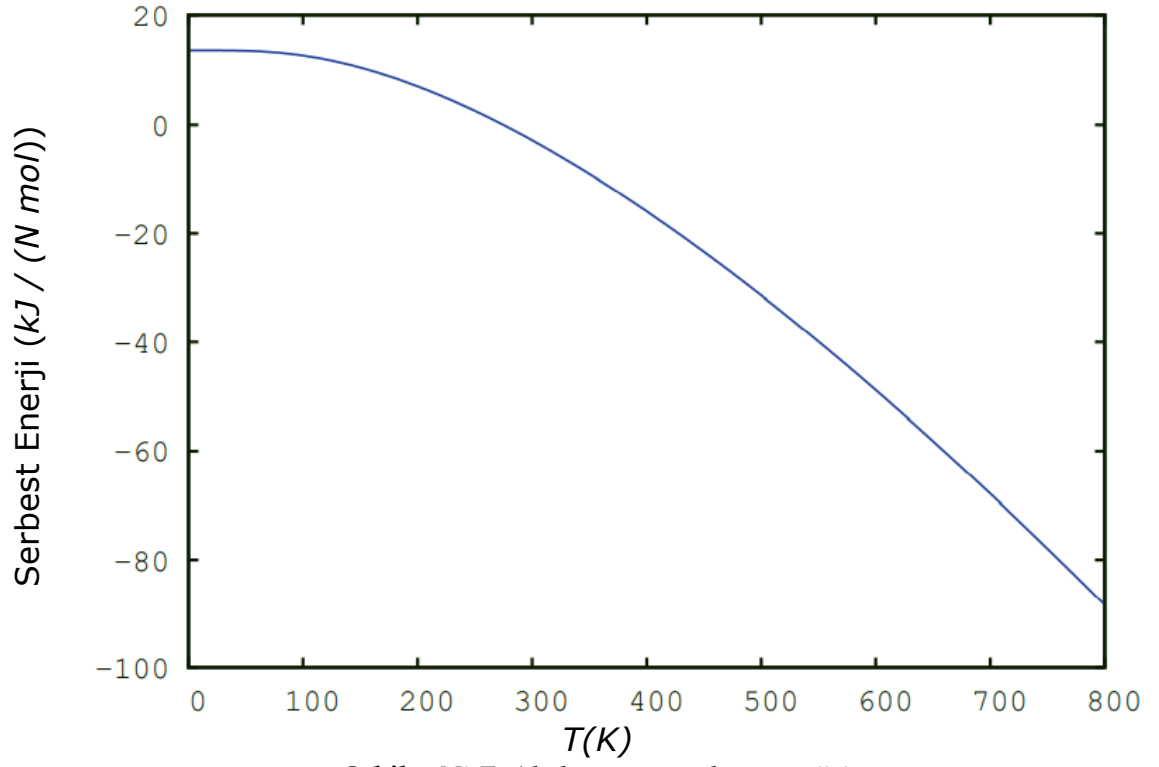
Uygulamalarda önem arz eden bir diğer özellik malzemenin anizotropik doğasıdır. Literatürde, teorik olarak malzemenin anizotropisini tahmin eden evrensel anizotropi (A^U) [21] gibi eşitlik/modeller mevcuttur. İzotropik malzemelerde A^U değeri sıfırdır. Sıfırdan sapma miktarı malzemenin anizotropiğünün derecesini gösterir. Ni₂ZnAl alaşımının anizotropi değeri 9,187 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuca göre çalışılan malzemelerin anizotrop olduğu söylenebilir. Anizotropinin daha anlaşılır olması için ELATE [22] yazılımında, minimum değerler yeşil, maksimum değerler mavi renk ile gösterilerek görselleştirilen anizotropik yapı Şekil 3'de verilmiştir. Aşırı derece yüke maruz bırakılan bir malzeme gerilim yönünde uzama eğilimi göstererek deformasyona neden olur. Bundan dolayı, Young modülünün düzlemler boyunca değişimi Şekil 3.a'da verilmiştir. Ni₂ZnAl alaşımının anizotropisi üzerine yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanılmadığından benzer yapıdaki X₂Tial (X=Au, Ru, Zr) alaşımlarının anizotropisi [19] ile kıyaslandığında, bu yapılar ve teorik hesaplamalardan elde edilen veriler ile tutarlıdır. Yapılan hesaplamalar ve Şekil 3'de verilen görseller dikkate alındığında, Ni₂ZnAl alaşımının anizotrop özellik göstereceği söylenebilir.



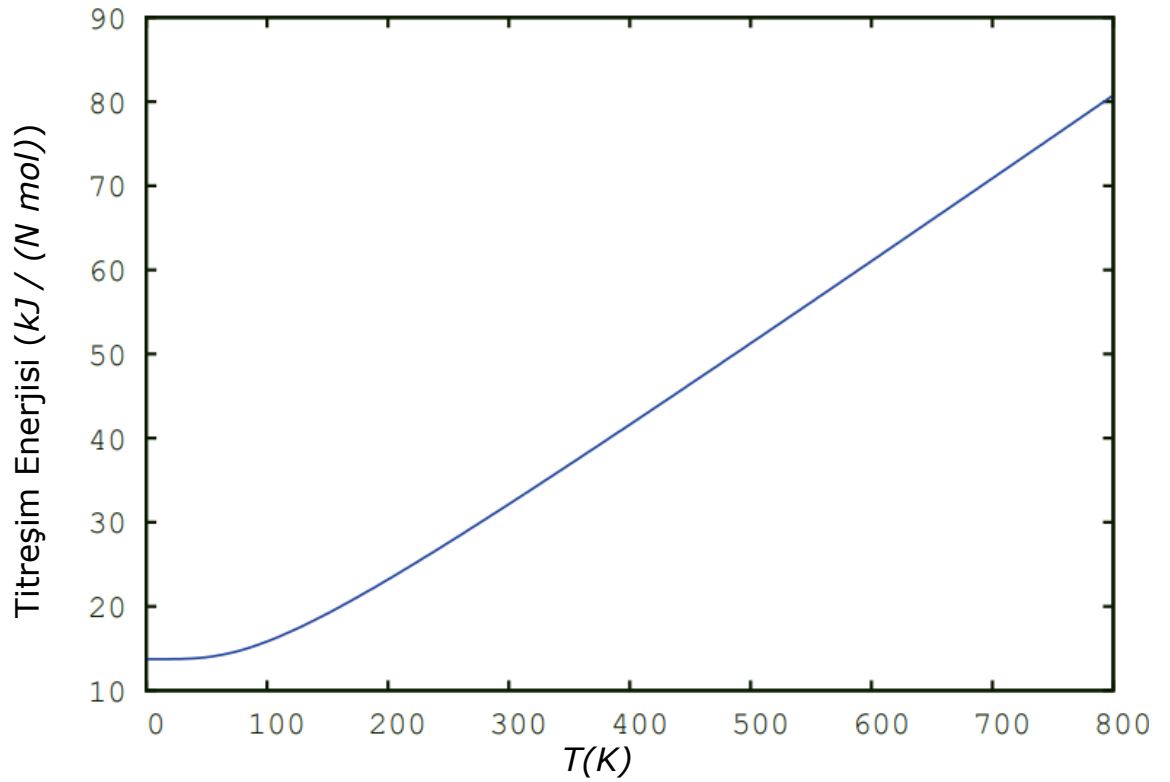
Şekil 3. Ni_2ZnAl alaşımının anizotropisi

Figure 3. Anisotropy of Ni_2ZnAl compound

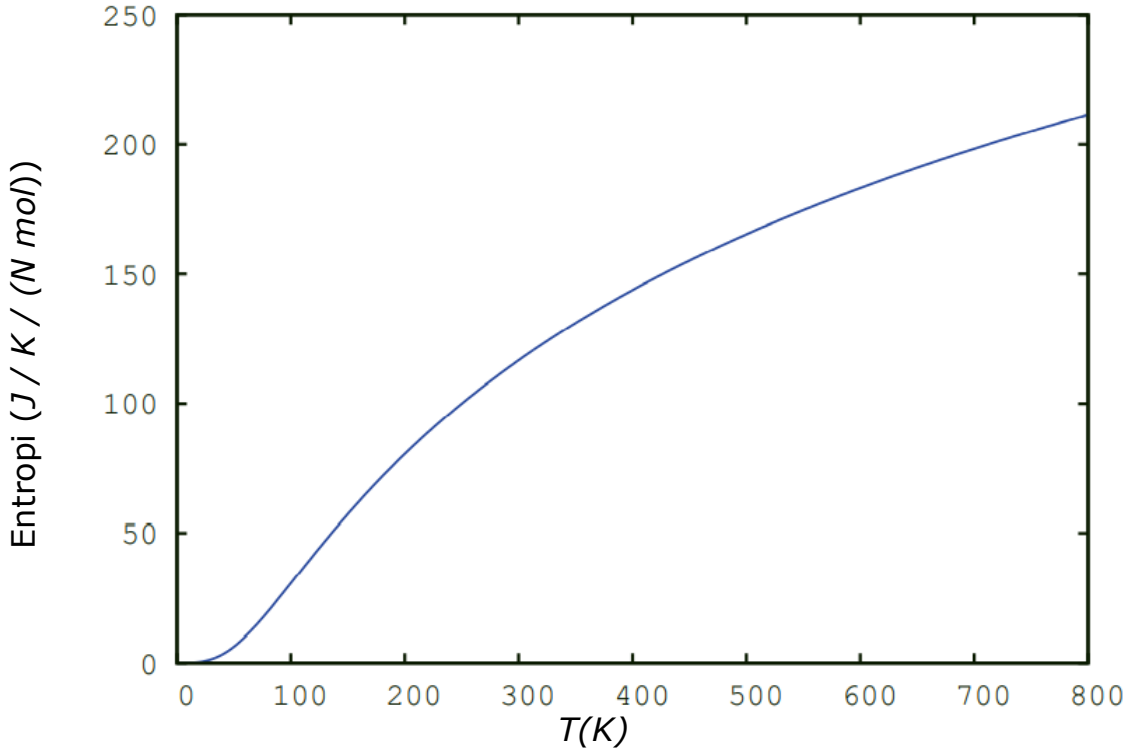
Ni_2ZnAl alaşımının optimize yapısı kuasi harmonik Debye modeli 0-800 K aralığında serbest enerji (Şekil 4), titreşim enerjisi (Şekil 5), entropi (Şekil 6) ve ısı sığası (Şekil 7) QE programına bütünleşmiş thermo_pw yazılımı ile hesaplanarak Şekil 4-7'de verilmiştir.



Şekil 4. Ni₂ZnAl alaşımının serbest enerjisi
 Figure 4. Free energy of Ni₂ZnAl compound

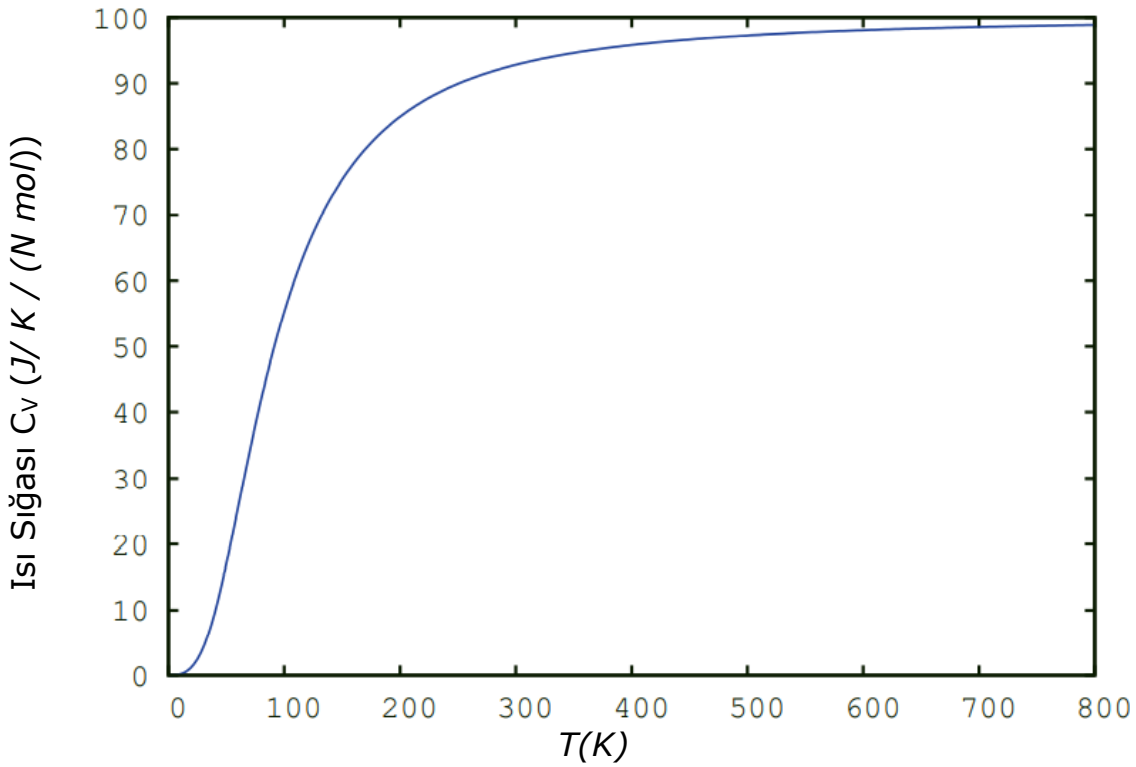


Şekil 5. Ni₂ZnAl alaşımının titreşim enerjisi
 Figure 5. Vibration energy of Ni₂ZnAl compound



Şekil 6. Ni_2ZnAl alaşımının entropisi

Figure 6. Entropy of Ni_2ZnAl compound



Şekil 7. Ni_2ZnAl alaşımının ısı sığası

Figure 7. Heat capacity of Ni_2ZnAl compound

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi serbest enerji sıcaklıkla ters orantılı olarak artmıştır. Yani artan sıcaklık değerlerine karşı serbest enerji değeri azalmıştır. Başka bir ifade ile artan sıcaklık değeri ile serbest enerji değeri daha negatif olmuştur. Negatif serbest enerji değerine sahip bir malzeme termal tepkimeye daha

rahat girer ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi termodinamik kararlılık gösterir. Titreşim enerjisi, bir malzemedeki atomların veya moleküllerin etkileşimlerinden üretilen enerjiyi ifade eder. Diğer bir ifade ile sistemde saklanan enerjidir [23]. Şekil 5'te verilen titreşim enerjisini değişimi incelendiğinde, artan sıcaklık değerine karşın titreşim enerjisi de artmıştır. Sıcaklığın artmasıyla artan titreşim enerjisi serbest enerjinin azalmasına neden olmuştur. Şekil 6'da verilen entropi-sıcaklık eğrisinden de görüldüğü gibi artan sıcaklıkla birlikte entropide de bir artış söz konusudur. Çünkü artan sıcaklık atomik hareketi ve sistemin kinetik enerjisini arttırır. Serbest enerji, entropik katkıdan ileri geldiğinden entropi ile serbest enerji ilişkilendirilebilir. Böylece serbest enerji ne kadar negatif olursa entropi de o kadar yüksek olur. Entropideki artış, alaşımın atomunun yarı çapı ile doğrudan ilişkilidir. Atomik yarıçap arttıkça entropi değeri de daha hızlı artar [24]. Grafikler kendi aralarında ve benzer yapıdaki Ru₂YGa (Y=Sc, Ti ve V) ile kıyaslandığında sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Isı sığasının sıcaklık ile değişim grafiği (Şekil 7) incelendiğinde doygunluğa ulaşmadan önce 200 K kadar hızla hemen hemen doğrusal bir değişim gösterdiği ancak 600 K sıcaklık değerine gelindiğinde Dulong-Petit [25] değerine yaklaştığı görülmektedir. Literatürde benzer yapıdaki Co₂ScAl bileşiği ile kıyaslandığında sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir [12]. Bir malzemede en yüksek frekans modunun uyarıldığı sıcaklık olarak isimlendirilen ve ısı sığasının doyum noktasına ulaşmaya başladığı Debye sıcaklığı 367,102 K olarak hesaplanmıştır.

Uygulamalarda bir diğer önemli özellikte erime sıcaklığıdır. Ni₂ZnAl alaşımının erime sıcaklığı elde edilen elastik sabitler kullanılarak hesaplanabilir [26].

$$T_m = 560.4 + 7.805C_{11} - 3.094C_{12} - 1.086C_{44} \quad (6)$$

Özer (2018) tarafından bildirilen eşitlik kullanılarak Ni₂ZnAl alaşımının erime sıcaklığı 1397,1 K olarak tahmin edildi. Tahmin edilen erime sıcaklığı 1000 K üzeri olduğundan Ni₂ZnAl alaşımı yüksek sıcaklık malzemesi olarak kullanılmaya potansiyel aday malzeme olabilir.

Isı iletkenlik kat sayısı, malzemenin kimyasal ve fiziksel yapısına bağlı olarak ısıyı ne kadar ilettiğinin bir ifadesidir. Literatürde, minimum termal iletkenliği ortalama ses hızı ve E' den tahmin eden eşitlikler önerilmiştir.

$$k_{min} = \frac{k_B}{2.48} m^3 (2v_t + v_l) \quad (7)$$

$$k_{min} = \left\{ \frac{1}{3} \left[2(2 + 2\sigma)^{3/2} + \left(\frac{1}{1-\sigma} - \sigma \right)^{3/2} \right] \right\}^{-1/3} k_B m^{2/3} \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Önerilen bu modeller kullanılarak hesaplanan minimum termal iletkenlik değerleri; 0,326 (Long model), 0,480 (Cahil model), ortalama olarak 0,403 W/mK'dir. Literatürde Ni₂ZnAl alaşımına yönelik yapılan bir ısı iletkenlik çalışmasına rastlanmadığından herhangi bir kıyaslama yapılamadı. Okuyucunun zihninde kolay bir yargıya ulaşması için bazı yapı malzemelerinin ısı iletkenlik kat sayıları; beton (0,814 W/mK), granit (2,855 W/mK) ve tuğla (0,692 W/mK)[29]. Yapı malzemeleri ile kıyaslandığında Ni₂ZnAl alaşımının ısı yalıtımı gerektiren uygulamalarda kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

4. SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan bu çalışmada öncelikle Ni₂ZnAl alaşımının temel durumdaki optimize yapısal parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra bu parametreler kullanılarak elastik sabitleri hesaplandı. Hesaplanan elastik sabitler mekanik kararlılık kriterlerini sağladığından, Ni₂ZnAl alaşımı mekanik olarak kararlıdır. Mekanik kararlı bileşiklerin elastik modülleri, sertlik, anizotropi ve Debye sıcaklığı gibi bir takım fiziksel özelliklerine teorik olarak bakılabilmektedir. Yapılan hesaplama ve analizlerin sonucuna göre,

- ✓ Ni₂ZnAl alaşımının 10 *GPa* Vicker sertliğinden daha küçük bir değere sahip olmasından dolayı sert olmayıp yumuşak bir malzeme olduğu söylenebilir. Bu bakımdan sertlik gerektiren uygulamalarda kullanılması çok da uygun değildir.
- ✓ Çalışılan malzemenin sünek/kırılgan olarak kategorize edilmesi gerekirse sünek sınıfında olduğu görüldü.
- ✓ İzotropi bakımından değerlendirildiğinde, malzeme anizotrop bir yapıya sahiptir.
- ✓ 1000 K üzeri erime sıcaklığı tahmin edildiği için yüksek sıcaklık uygulamalarına potansiyel aday malzeme olarak değerlendirilebileceği yargısına ulaşılmıştır.

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)

Grup çalışmasının bir ürünü olmadığından bireysel yazar katkılarının tanımlanması gerek görülmemiştir.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgement)

Bu çalışmada kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM), #1012332022 # numaralı desteğiyle sağlanmıştır. Ayrıca yapılan bu çalışma, "Ni₂XAl (X=Ni, Zn, Ti, Cu, V, Sc) Bileşiklerinin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İlk Prensipler Yöntemi ile İncelenmesi" isimli "OKÜBAP-2022-PT1-007" numaralı proje ile Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)






- [1] Z. Bai, L. Shen, G. Han, ve Y. P. Feng, "Data Storage: Review of Heusler Compounds", *SPIN*, vol. 02, no. 04, pp. 1230006, 2012.
- [2] T. Graf, C. Felser, ve S. S. P. Parkin, "Simple rules for the understanding of Heusler compounds", *Prog. Solid State Chem.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–50, 2011.
- [3] T. Graf, C. Felser, ve S. S. P. Parkin, "Simple rules for the understanding of Heusler compounds", *Prog. Solid State Chem.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–50, 2011.
- [4] M. Gilleßen, "Maßgeschneidertes und Analytik-Ersatz", RWTH Aachen University, Aachen, 2009.
- [5] A. Kokalj, "Computer graphics and graphical user interfaces as tools in simulations of matter at the atomic scale", içinde *Computational Materials Science*, vol. 28, no. 2, pp. 155–168, 2003.
- [6] P. Giannozzi *vd.*, "QUANTUM ESPRESSO: A modular and open-source software project for quantum simulations of materials", *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 21, no. 39, 2009.

- [7] M. Methfessel ve A. T. Paxton, "High-precision sampling for Brillouin-zone integration in metals", *Phys. Rev. B*, vol. 40, no. 6, pp. 3616, 1989.
- [8] O. Örnek, A. İyigör, ve N. Arıkan, "L12 yapıdaki Co₃Al ve Co₃Ta alaşımlarının mekanik ve dinamik özellikleri", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, vol. 32, no. 2, 2017.
- [9] M. Özdoğan, K. Turgut, N. Arıkan, A. İyigör, ve A. Candan, "The first principle study of Ni₂ScGa and Ni₂TiGa", *AIP Conference Proceedings* 2014, 1618, pp. 178–181.
- [10] S. Kirklin *vd.*, "The Open Quantum Materials Database (OQMD): assessing the accuracy of DFT formation energies", *npj Comput. Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 15010, 2015.
- [11] J. E. Saal, S. Kirklin, M. Aykol, B. Meredig, ve C. Wolverton, "Materials Design and Discovery with High-Throughput Density Functional Theory: The Open Quantum Materials Database (OQMD)", *JOM*, vol. 65, no. 11, pp. 1501–1509, 2013.
- [12] N. Arıkan *vd.*, "Electronic and phonon properties of the full-Heusler alloys X₂YAl (X = Co, Fe and Y = Cr, Sc): a density functional theory study", *J. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 12, pp. 4180–4190, 2014.
- [13] S. Al, N. Arıkan, S. Demir, ve A. İyigör, "Lattice dynamic properties of Rh₂XAl (X=Fe and Y) alloys", *Phys. B Condens. Matter*, vol. 531, pp. 16–20, 2018.
- [14] N. Arıkan, G. Dikici Yıldız, Y. G. Yıldız, ve A. İyigör, "Electronic, Elastic, Vibrational and Thermodynamic Properties of HfIrX (X = As, Sb and Bi) Compounds: Insights from DFT-Based Computer Simulation", *J. Electron. Mater.*, vol. 49, no. 5, pp. 3052–3062, 2020.
- [15] O. Örnek, A. İyigör, A. S. Meriç, M. Çanlı, M. Özdoğan, ve N. Arıkan, "First-Principle Investigations of (Ti_{1-x}V_x)₂FeGa Alloys. A Study on Structural, Magnetic, Electronic, and Elastic Properties", *Russ. J. Phys. Chem. A*, vol. 95, no. 13, pp. 2592–2599, 2021.
- [16] T. Ozer ve S. Cabuk, "First-principles study of the structural, elastic and electronic properties of SbXI (X=S, Se, Te) crystals", *J. Mol. Model.*, vol. 24, no. 3, s. 66, 2018.
- [17] Y. Tian, B. Xu, ve Z. Zhao, "Microscopic theory of hardness and design of novel superhard crystals", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 33, pp. 93–106, 2012.
- [18] W. Liu, Y. Niu, ve W. Li, "Theoretical prediction of the physical characteristic of Na₃MO₄ (M=Np and Pu): The first-principles calculations", *Ceram. Int.*, vol. 46, no. 16, pp. 25359–25365, 2020.
- [19] S. Al, N. Arıkan, ve A. İyigör, "Investigations of Structural, Elastic, Electronic and Thermodynamic Properties of X₂TiAl Alloys: A Computational Study", *Zeitschrift für Naturforsch. A*, vol. 73, no. 9, pp. 859–867, 2018.
- [20] J. Haines, J. Léger, ve G. Bocquillon, "Synthesis and Design of Superhard Materials", *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–23, 2001.
- [21] S. I. Ranganathan ve M. Ostoja-Starzewski, "Universal Elastic Anisotropy Index", *APS*, vol. 101, no. 5, 2008.
- [22] R. Gaillac, P. Pullumbi, ve F.-X. Coudert, "ELATE: an open-source online application for analysis and visualization of elastic tensors", *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 28, no. 27, s. 275201, 2016.
- [23] A. M. Sarpkaya ve N. Arıkan, "Kübik perovskit LaZnO₃ bileşiğinin yapısal, elektronik, elastik ve termodinamik özelliklerini araştırmak için ab initio hesaplamaları", *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Edeb. Fakültesi Derg.*, 2022.
- [24] M. Çanlı, E. İlhan, ve N. Arıkan, "First-principles calculations to investigate the structural, electronic, elastic, vibrational and thermodynamic properties of the full-Heusler alloys X₂ScGa (X = Ir and Rh)", *Mater. Today Commun.*, vol. 26, s. 101855, 2021.
- [25] A. T. Petit ve P. L. Dulong, "Recherches sur quelques points importants de la théorie de la chaleur.", *Annales de chimie et de physique*, Paris, 1819, pp. 395–413.
- [26] T. Özer, "Determination of melting temperature", 2018, pp. 87–99.
- [27] D. G. Cahill, S. K. Watson, ve R. O. Pohl, "Lower limit to the thermal conductivity of disordered crystals", *Phys. Rev. B*, vol. 46, no. 10, s. 6131, 1992.
- [28] J. Long, C. Shu, L. Yang, ve M. Yang, "Predicting crystal structures and physical properties of novel superhard p-BN under pressure via first-principles investigation", *J. Alloys Compd.*, vol. 644, pp. 638–644, 2015.

- [29] H. Adin, "Mardin ve Midyat'ta Kullanılan Bina Yapı Taşlarının Bazı Fiziksel Özellikleri", *Mühendis ve Makina*, vol. 48, no. 570, pp. 13–17, 2007.



PANDEMİ SÜRECİNDE HEMŞİRE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ

¹Müberra KOÇAK , ²Gizem EKREN , ³Rabia YUMUŞAK ,
⁴Tamer EREN , ⁵Hacı Mehmet ALAKAŞ 

^{1, 2, 4, 5} Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE

³Kapadokya Üniversitesi, Kapadokya Meslek Yüksekokulu, Nevşehir, TÜRKİYE

¹muberrakocak98@gmail.com, ²gizemekren03@gmail.com, ³rabia.yumusak@kapadokya.edu.tr,




⁴tamereren@gmail.com, ⁵hmalagas@kku.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Pandemi döneminde artan iş yükü dikkate alınarak hemşirelerin çalışma günleri çizelgelenmiştir.
- Çizelgelemede mevcut çalışma düzeninden farklı olarak yeni bir çalışma düzeni önerilmiştir.
- Yeni çalışma düzeni ile hemşirelerin pandemi riskleri azaltılması ve dengeli çalışma düzeninin oluşturulması amaçlanmıştır.



PANDEMİ SÜRECİNDE HEMŞİRE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ

¹Müberra KOÇAK , ²Gizem EKREN , ³Rabia YUMUŞAK ,
⁴Tamer EREN , ⁵Hacı Mehmet ALAKAŞ 

^{1, 2, 4, 5} Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE

³Kapadokya Üniversitesi, Kapadokya Meslek Yüksekokulu, Nevşehir, TÜRKİYE

¹ muberrakocak98@gmail.com, ² gizemekren03@gmail.com, ³ rabia.yumusak@kapadokya.edu.tr,

⁴ tamereren@gmail.com, ⁵ hmalagas@kku.edu.tr

(Received: 23.05.2022; Accepted in Revised Form: 17.02.2023)

ÖZ: Pandemi sürecinde sağlık kuruluşlarında çalışan hemşirelerin, uzun çalışma saatlerinin psikolojik ve fiziksel anlamda hemşireleri olumsuz etkilediği görülmektedir. Pandemi süreciyle hastanelerde artan iş yükü, özellikle 24 saat süren vardiya ve nöbet sistemi içinde çalışmanın ağır ve yorucu olması ve hemşirelerin düzensiz bir iş programına maruz kalması sonucunda personellerin iş ve kişisel yaşam kalitesi olumsuz yönde etkilenmektedir. Bunun sonucu olarak hastalara verilen hizmetin kalitesi de düşmektedir. Hem hemşirelerin çalışma şartlarından kaynaklı olumsuzlukların giderilmesi hem de hasta memnuniyetinin artırılması amacıyla bu çalışmada hemşire çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bir devlet hastanesinin nöroloji yoğun bakım ünitesinde çalışan 18 hemşirenin çizelgenmesi problemi için iki çözüm önerisinde bulunulmuştur. İlk olarak hastanenin mevcut çalışma şartları dikkate alınarak 0-1 hedef programlama yöntemi ile çözüm sunulmuştur. İkinci olarak 24 saatlik vardiyadan kaynaklı oluşabilecek risklerin önüne geçebilmek için 8 ve 16 saatlik iki vardiya sistemi üzerinde çalışılarak yeni bir model önerisinde bulunulmuştur. Önerilen modellerde hastanenin kuralları, hemşire özel istekleri ve tecrübeleri dikkate alınarak adil ve dengeli bir çalışma programı oluşturulmuştur. Bu çalışma gerçek hayat problemini ele almakla birlikte mevcut durum analizi ve yeni vardiya sistemi önerisiyle hemşire çizelgeleme problemine yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hemşire Çizelgeleme Problemi, 0-1 Hedef Programlama, Personel Yönetimi, Hastane Yönetimi, Pandemi

Goal Programming Model for Nurse Schedule Problem in the Pandemic Process

ABSTRACT: It is observed that nurses working in health institutions during the pandemic process, long working hours negatively affect nurses in psychological and physical terms. As a result of the pandemic process, the increasing workload in hospitals, especially the heavy and exhausting 24-hour shifts and work in the seizure system, and the fact that nurses are exposed to an irregular work schedule, the quality of work and personal life of staff is adversely affected. As a result of this, the quality of service provided to patients also decreases. In order to eliminate the negativity caused by the working conditions of nurses and to increase customer satisfaction, the problem of nurse scheduling was discussed in this study. Two solutions have been proposed for the nurse scheduling problem in the neurology intensive care unit, where 18 nurses work at the state hospital. Firstly, the solution was presented with the 0-1 goal programming method taking into account the current working conditions of the hospital. Secondly, in order to prevent the risks that may arise from a 24-hour shift, a new model was proposed by working on a two-shift system of 8 and 16 hours. In the proposed models, a fair and balanced work program has been established taking into account the rules of the hospital, the specific wishes and experiences of the nurses. This study not only addresses the real-life problem, but also

*Corresponding Author: Tamer EREN, tamereren@gmail.com

provides a new perspective on the nurse scheduling problem with the analysis of the current situation and the proposal of a new shift system.

Keywords: Nurse Scheduling Problem, 0-1 Goal Programming, Personnel Management, Hospital Management, Pandemic

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sınırlı kaynaklara rağmen işletme ihtiyacını karşılamak üzere işgücü kaynaklarının en iyi şekilde tahsis edilmesi personel çizelgeleme olarak tanımlanabilir. Personel çizelgeleme problemi, çok aşamalı ve karmaşık bir problemdir[1]. Hizmet sektöründe ise hasta memnuniyetinin sağlanması, çok aşamalı karmaşık bir problem olan personel çizelgeleme ile doğrudan ilişkilidir. Hem hasta memnuniyetinin sağlanması hem de çalışanların potansiyellerini maksimum verimlilikte kullanabilmesi için personellerin çalışma çizelgelerinin optimize edilmesi gerekmektedir [2].

Sağlık kuruluşları hizmetlerini 7 gün, 24 saat kesintisiz bir şekilde sürdürmeleri elzemdir. Bu durum hastane hizmetlerinde büyük rol oynayan hemşireler için oldukça zorlayıcı çalışma şartlarını da beraberinde getirmektedir. Yoğun iş temposuna sahip olan hemşirelerin iş çizelgelerinin adil ve dengeli olması hem hasta sağlığı hem de personel sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir. Aksi takdirde hemşireler fiziksel ve psikolojik açıdan olumsuz etkilenmektedirler [3].

Personel çizelgeleme literatürü incelendiğinde sağlık alanında yapılan çalışmalar konunun öneminden dolayı ilk sırada yer almaktadır. Bu sektörde üzerinde en çok durulan problemlerden bir tanesi hemşire çizelgelemedir. Hemşirelere düşen hasta sayılarında fazlalık, vardiyalar için gerekli hemşire sayısındaki yetersizlik, çalışma şartlarındaki olumsuzluklar gibi etkenler verilen hizmetin kalitesini düşürmektedir. Covid-19 pandemi sürecinin de getirmiş olduğu zorluklara rağmen verimli çalışma ve kaliteli hizmet sunabilmek için hemşirelerin vardiyalara adil ve dengeli atanması, özel izin isteklerinin dikkate alınması, vardiyalara atanan stajyer, tecrübeli hemşire sayılarının dengeli olması gibi etkenlere dikkat etmek gerekmektedir. Bu noktada beklentilere karşılık dengeli ve eşit bir hemşire çizelgeleme yapmak önemlidir.

Özel izin isteklerinin ve hemşire yetkinliklerinin dikkate alındığı bu çalışmada matematiksel programlama modeli kullanılarak çözüm elde edilmiştir. Model oluşturulurken hemşirelerin ilgili günün herhangi bir vardiyasına atanıp atanmama durumunu göstermek amacıyla 0-1 Hedef Programlama (HP) yönteminden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada, bir devlet hastanesinin 3. basamak nöroloji yoğun bakım ünitesinde çalışmakta olan 18 hemşirenin dört haftalık çalışma dönemi için çizelge hazırlanmıştır. 24 saat hizmet veren bölümde gündüz (08:00-16:00), gece (16:00-08:00) ve tam gün (08:00-08:00) olacak şekilde üç vardiya çalışma sistemi uygulanmaktadır. Ele alınan gerçek hayat probleminde günlere ve vardiyalara göre talep değişmektedir. Çalışmanın birinci aşamasında hastanenin kuralları, hemşire özel istekleri ve tecrübeleri dikkate alınarak mevcut durum için aylık çalışma planı hazırlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise hastanede uygulanan 24 saatlik vardiyalar nedeniyle hastalara yapılan yanlış uygulamaların ve istenmeyen sonuçların önüne geçmek amacıyla 8 ve 16 saatlik iki vardiyalı sisteme geçilmesi önerilmiştir. Önerilen yeni sistemde aylık olarak çalışılması gereken toplam vardiya saati, haftalık olarak en az 40 en fazla 45 saat olarak her haftaya eşit şekilde dağıtılmış ve çizelgede daha dengeli atamalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde çözüm yöntemi olan hedef programlama hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde hastanede yapılan uygulamaya yer verilmiştir. Son olarak dördüncü bölümde yapılan çalışmanın sonuçlarına vurgu yapılmış ve ileride yapılacak çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatürde sağlık alanında özellikle doktor [4]-[6], ameliyathane [7]-[9] ve performans çizelgeleme [10], [11] problemleriyle birlikte daha çok hemşire çizelgeleme [12]- [14] problemleri yer almaktadır. Moz ve Pato [15] yaptıkları çalışmada Portekiz devlet hastanesindeki hemşirelerin atama probleminin çözümü için tam sayılı programlamadan yararlanırken Burke ve diğ. [16] ise öncelikle literatürde yer alan çalışmaları incelemiş, hemşire kayıtlarının daha uzun zaman periyodunu kapsayan planlamalarda oynadığı role dikkat çekmişlerdir. Ayrıca yöneylem araştırma tekniklerinden yapay zeka yöntemlerine kadar olan disiplinler arası spektrumdaki çözüm yaklaşımlarını tanımlamış ve eleştirel olarak değerlendirmişlerdir. Hemşire çizelgeleme alanında sıkça başvurulan çalışmalardan olan Azaiez ve Al Sharif [17] gerçekleştirdikleri çalışmada Fransa'da bir kamu hanesindeki anesteziyoloji hemşirelerinin çizelgeleme problemini çözmek için tam sayılı programlama ve kısıt programlama ile iki matematiksel model geliştiren Trilling ve diğ. [18] ise bu iki modelin kıyaslaması ile adaletli bir çizelge oluşturmayı hedeflemişlerdir. İki aşamalı olarak hemşire çizelgeleme problemini ele alan Tsai ve Li [19] ise problemlerinde matematiksel model ile genetik algoritma yöntemlerini kullanarak ilk aşamada, hemşirelerin optimal tatil programlarını, ikinci aşamada ise hemşire sıralama çizelgesini oluşturmuş ve Tayvan'daki bir hastane için gerçekleştirdikleri uygulamada hükümet düzenlemelerini, hastane yönetiminin gerekliliklerini dikkate alarak model çözüm sürelerinin önerilen yaklaşımla iyileştiğini de vurgulamışlardır. Tam sayılı programlama ile komşu arama yöntemlerini kullanarak hibrit bir model öneren Burke ve diğ. [20] çok amaçlı bir model önerisi ile Hollanda'da bir hastanedeki hemşireler için uygulama yapmışlardır. Topaloğlu ve Selim [21] de gerçekleştirdikleri çalışmada çok amaçlı tam sayılı programlama ile modellerini kurmuşlar ve bunun yanı sıra üç farklı bulanık hedef programlama modeli geliştirmişlerdir. Diğer çalışmalardan farklı bir yaklaşım ile kıdem farkını da ele alan Zen-El-Din ve diğ. [22] ise ikili tam sayılı programlama yönteminden yararlanıp hemşireler arasında bireysel tercihleri de dikkate alarak adaletli bir çizelge oluşturmayı amaçlamışlardır. 0-1 hedef programlama yöntemini kullanan Bağ ve diğ. [23] hemşire çizelgeleme problemini çözmek için hedef ağırlıklarını ANP yöntemi ile belirlerken Hedef programlamayı kullanan diğer yazarlardan olan Varlı ve Eren [24] ise çalışmalarında Kırıkkale'de bir hastanenin yoğun bakım, ameliyathane ve acil bölümlerinde, hastanenin her vardiyada ihtiyaç duyduğu hemşire sayısını karşılamaya çalışmışlar, Aktürk ve diğ. [2] bir devlet hastanesinde çalışan hemşirelerin belirlenmiş olan dört vardiyaya özel izin kısıtlarını baz alarak dengeli bir şekilde atanmalarını hedeflemişler ve Varlı ve diğ. [25] ise bir hastanede çalışan hemşireler için bazı özel kısıtları dikkate alarak aylık çalışma planlarını en iyi şekilde oluşturmayı amaçlamışlardır. Yine Al-Hinai ve diğ. [12] acil serviste çalışan hemşirelerin vardiya dağılımındaki adaleti artırmak, Aktunç ve diğ. [13] sert ve yumuşak kısıtları olan çok amaçlı bir tamsayı programını revize edip, adil iş yükü sağlayan optimal bir çizelge üretmek için hedef programlamayı kullanmışlardır.

Literatürde ele alınan hemşire çizelgeleme problemlerinde önerilen modeller incelendiğinde tek amaçlı ve çok amaçlı çalışmalar bulunmaktadır. Tek amaçlı modellerde yetkinlik amacını ele alan çalışmalar bulunmaktadır [26]-[32]. Yetkinlik dışında sadece eşitlik amacını dikkate alan çalışmalar da literatürde yer almaktadır [19], [32], [34]. Bu çalışmalar dışında hem eşitlik hem de yetkinlik amaçlarını birlikte değerlendiren çalışmalar bulunmaktadır [35]-[37]. İki amacı birlikte kullanan bir diğer çalışmada ise eşitlik ve fazla mesai maliyetini birlikte değerlendirmişlerdir [38]. Lim ve diğ. [39] ise fazla mesai maliyeti ve yetkinlik amaçlarını birlikte değerlendirmişlerdir. Son olarak eşitlik, fazla mesai maliyeti ve yetkinlik amaçlarının hepsini birlikte değerlendiren çalışmalar bulunmaktadır [40]-[42]. Literatürde hemşire çizelgeleme problemini ele alan çalışmalar incelendiğinde modellerin tek amaçlı ve çok amaçlı olmasının yanı sıra kullanılan kısıtlar açısından da farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Genellikle ardışık iş günlerinin kısıtlara eklendiği gözlemlenmiştir. Ardından ardışık izin günleri dikkate alınan kısıtlar arasındadır. Son olarak modellerde en az kullanılan vardiyalar arasındaki minimum dinlenme süresi kısıtıdır. Sonuç olarak hemşire çizelgeleme problemini ele alan çalışmaların amaçlar ve kısıtlar açısından özeti Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Literatürdeki çalışmaların özeti*Table 1: Summary of studies in the literature*

Çalışma	AMAÇLAR			KISITLAR		
	Eşitlik	Fazla mesai maliyeti	Yetkinlik	Ardışık iş günleri	Ardışık izin günleri	Vardiyalar arasındaki minimum dinlenme süresi
Mason ve Smith [26]			✓	✓		
Jaumard ve diğ. [40]	✓	✓	✓	✓		
Bard ve Purnomo [35]	✓		✓	✓	✓	✓
Eveborn ve Rönnqvist [36]	✓		✓	✓	✓	
Purnomo ve Bard [43]				✓		✓
Maenhout ve Vanhoucke [27]			✓			
Tsai ve Lee [19]	✓					
He ve Qu [37]	✓		✓	✓		
Burke ve Curtois [32]			✓	✓		
Leksakul ve Phetsawat [38]	✓	✓				
Legrain ve diğ. [28]			✓	✓		✓
Santos ve diğ. [29]			✓	✓	✓	
Ceschia ve diğ. [30]			✓	✓	✓	
Lim ve Mobasher [41]	✓	✓	✓			
Lim ve diğ. [39]		✓	✓			
Zhong ve diğ. [33]	✓			✓		
Rahimian ve diğ. [44]				✓	✓	
Rahimian ve diğ. [45]				✓		
Inafune ve diğ. [31]			✓			
Strandmark ve diğ. [46]				✓	✓	✓
Özcan ve diğ. [34]	✓			✓	✓	
Guo ve Bard [42]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bu çalışma	✓			✓	✓	

Bu çalışmada diğer hemşire çizelgeleme çalışmalarından farklı olarak literatürde de ayrı değerlendirilen birden fazla, karmaşıklığa neden olabilecek hedefler aynı anda ele alınmıştır. Sistemin özel kısıtları modele yansıtılmıştır. Ayrıca 24 saatlik vardiya kaldırılarak hemşire çizelgeleme probleminde yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Önerilen yeni model ile 24 saatlik vardiya sonucunda oluşabilecek dikkat eksikliğinden kaynaklı kaza ve yanlış uygulamaların önüne geçilerek hemşire uygulamalarından kaynaklı sakatlık veya ölümlerin önüne geçilmiştir. Bununla birlikte hemşirelerin 24 saatlik vardiya çıkışında yorgunluk veya dikkat eksikliğinden kaynaklı oluşabilecek trafik kazası gibi ölüm veya sakatlıkla sonuçlanabilecek olumsuz durumların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca pandemi sürecinde uygulanması önerilen yeni vardiya sistemi ile virüsü kapan bir hemşirenin 24 saat boyunca arka arkaya bakacağı hasta sayısı miktarı azalacağı için bu açıdan da hem uygulamaya hem de literatüre katkı sağlamaktadır.

3. HEDEF PROGRAMLAMA (GOAL PROGRAMMING)

Bu çalışmada kullanılan hedef programlama yönteminin temeli doğrusal programlamaya dayanmakta olup birden fazla hedefi aynı anda gerçekleştirme prensibine sahiptir. HP yöntemi ile

sistem kısıtlarının sağlandığı ve mümkün olduğunca tüm amaçlara ulaşan bir çözüm elde edilir. Belirlenen amaçların tam olarak gerçekleşmediği durumlarda ise hedef değerlerden sapmalar minimize edilmektedir. Sapmanın olduğu durumda bazı amaçlar en iyi çözüme ulaşırken bazıları en iyi çözüme ulaşamasa da etkin bir çözüm elde edilmiş olacaktır [47].

Doğrusal programlama ile hedef programlama arasındaki temel fark, doğrusal programlamada amaç fonksiyonunu optimal kılan çözüm aranırken hedef programlamada hedeflere ait sapma değerlerinin minimizasyonu üzerine durulmasıdır. Hedef programlamada kullanılan tanımlar şu şekilde sıralanabilir:

Hedef: Model çözüm sonucunda kesin olarak ulaşılmaması istenen ifadedir.

Hedef Kısıtları: Ulaşılmaması istenen hedefler, hedef programlama modeline hedef kısıtları olarak aktarılır. Hedef kısıtlarının sağlanması sistem kısıtlarının gerçekleştirilmesinden sonra gelir ve çok katı olmayıp, sapmaların açıklanmasıyla ortaya çıkan esnek kısıt fonksiyonlarıdır.

Sapma Değişkenleri: Modelde yalnızca hedef kısıtlarında ve amaç fonksiyonunda bulunan sapma değişkenleri, her bir hedef veya alt hedeften, pozitif ve negatif sapmaları göstermektedir. Belirlenen hedef için altında kalma veya aşılma durumlarından ikisi aynı anda gerçekleşmeyeceği için bu iki sapma değişkeninden biri daima sıfır değerini alacaktır [47].

Negatif Sapma Değişkeni (d_i^-): Hedefin ne kadar altında kaldığını gösteren değişkendir.

Pozitif Sapma Değişkeni (d_i^+): Hedefin ne kadar aşıldığını gösteren değişkendir.

Hedef programlamada değişkenler ve parametreler:

x_j : j. karar değişkeni

b_i : i. hedef için ulaşılmak istenen değer

a_{ij} : i. hedefin j. karar değişkeni katsayısı

d_i^- : i. hedefin negatif sapma değişkeni

d_i^+ : i. hedefin pozitif sapma değişkeni

Genel gösterim şekli aşağıda verilmiştir:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^m (d_i^+ + d_i^-) \quad (1)$$

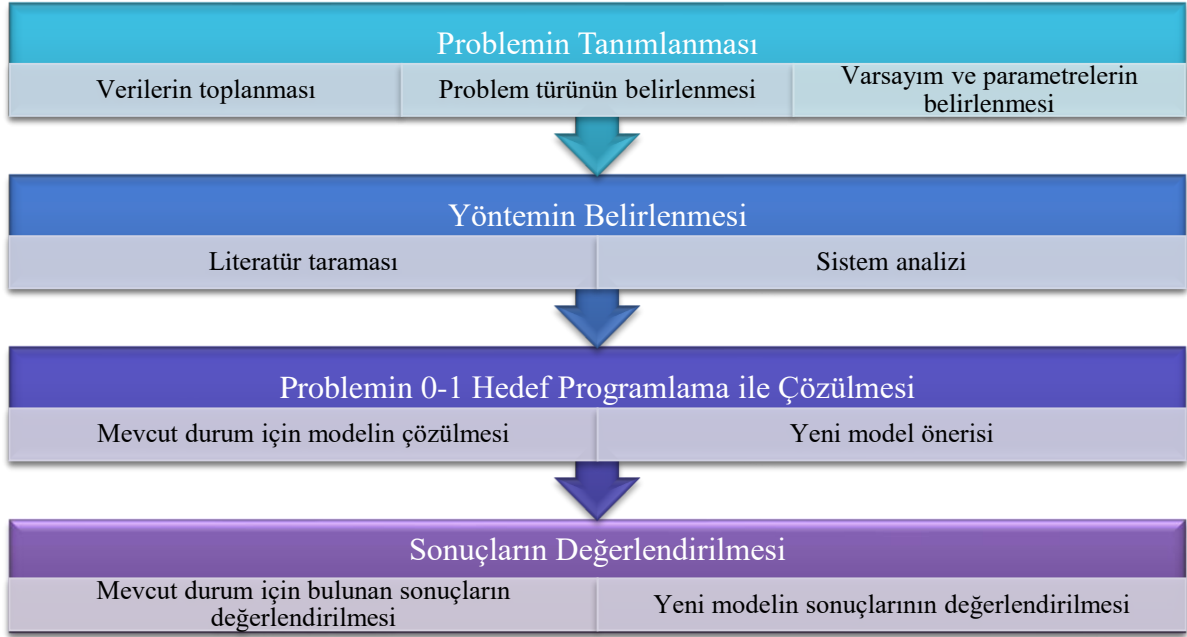
$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + d_i^+ + d_i^- = b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

4. UYGULAMA (CASE STUDY)

Bu çalışmada bir devlet hastanesinin 3. basamak nöroloji yoğun bakım ünitesinde çalışmakta olan hemşirelerin özel izin istek ve personel yeterlilikleri dikkate alınarak ilk olarak 8, 16 ve 24 saatlik üç vardiyalı çalışma sistemi için dengeli ve eşit şekilde 4 haftalık çizelge yapılması amaçlanmıştır. İkinci olarak ise 24 saatlik vardiyalar nedeniyle hastalara yapılan yanlış uygulamaların ve istenmeyen sonuçların önüne geçmek amacıyla 24 saatlik vardiya kaldırılarak 8 ve 16 saatlik iki vardiyalı sistem üzerinde çalışılmış ve yeni bir model önerisinde bulunulmuştur. Uygulamada sırasıyla takip edilen adımlar aşağıda Şekil 1'deki akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 1. Uygulama akış şeması
Figure 1. Application flow chart

4.1. Mevcut Durum İçin Önerilen Model (Suggested Model for Current Situation)

4.1.1. Problemin tanımlanması (Problem definition)

Çalışmada; bir devlet hastanesinin 3.basamak nöroloji yoğun bakım ünitesindeki 18 hemşire için 28 günü kapsayan bir çizelgeleme amaçlanmaktadır. 24 saat hizmet veren bölümde gündüz (08:00-16:00), gece (16:00-08:00) ve tam gün (08:00-08:00) olacak şekilde 8, 16, 24 saatlik üç vardiya çalışma sistemi uygulanmaktadır. Hafta içi gündüz ve gece vardiyasına en az 4, en fazla 5; hafta sonu tam gün vardiyasına en az 3, en fazla 4 hemşire atanmalıdır ve diğer hemşireler izinli olmalıdır.

4.1.2. Verilerin toplanması (Data collection)

Çalışma için gerekli veriler şu şekilde sıralanabilir:

Hastane yönetimi tarafından belirlenen çalışma kuralları:

- Her hemşire bir dönemde en az 160 saat, en fazla 180 saat çalışmalıdır.
- Her hemşire hafta içi iki vardiyadan sadece birinde bulunmalıdır.
- Her hemşire izinli olduğu günlerde çalışmamalıdır.
- Her vardiya için gerekli hemşire sayısı karşılanmalıdır.
- Hafta içi gündüz ve gece vardiyalarında en az 4, en fazla 5 hemşire bulunmalıdır.
- Hafta sonu vardiyasında en az 3, en fazla 4 hemşire bulunmalıdır.
- Her hemşire ardışık en fazla 24 saat çalışabilir.
- Herhangi bir hemşire, herhangi bir günde gece vardiyasına atanmışsa bir sonraki günün gündüz ve gece vardiyasına atanmamalıdır.
- Herhangi bir hemşire tam gün vardiyasına atandıktan sonra 24 saat izinli olmalıdır.

Hemşire özel izin istekleri:

- 1 numaralı hemşire perşembe ve cuma günleri sadece gündüz vardiyasına atanmalıdır. (Akşamları evde hasta bakımı yapmaktadır.)
- 3 numaralı hemşire 11. günde yıllık izine ayrıldığı için çalışmamalıdır.
- 3 numaralı hemşire 16. ve 18. günler arasında yıllık izine ayrıldığı için çalışmamalıdır.

- 11 numaralı hemşire 9. ve 10. günler arasında yıllık izine ayrıldığı için çalışmamalıdır. Yetkinlik/Yeterlilik kısıtı:
- 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 numaralı tecrübeli hemşirelerden en az birinin hafta sonu vardiyalarında olması istenmektedir.
- Her vardiyada en fazla bir öğrenci bulunabilir. (3 ve 8 numaralı hemşireler stajyer)

4.1.3. Varsayımların belirlenmesi (Determination of assumptions)

Hastane verileri ve önceki çizelgelenmeler incelenmiştir. İnceleme sonucu yapılacak çizelgeleme için belirlenen varsayımlar:

- Çizelgeleme dönemi 28 gün olarak alınmıştır.
- Planlanmış izinler dışında herhangi bir izin kullanılmadığı varsayılmıştır.
- Hafta içi tam gün vardiyasına atanan hemşire nöbetçi olarak çalışmaktadır.

4.1.4. Parametreler (Parameters)

i: Hemşire indeksi	$i = 1, 2, \dots, n$
n: Serviste çalışan hemşire sayısı	$n = 18$
j: Gün indeksi	$j = 1, 2, \dots, m$
m: Gün sayısı	$m = 28$
hi: hafta içine denk gelen günler kümesi	$hi = 1, 2, \dots, 12, 15, \dots, 19, 22, \dots, 26$
hs: hafta sonuna denk gelen günler kümesi	$hs = 6, 7, 13, 14, 20, 21, 27, 28$
persembe: persembe gününe denk gelen günler kümesi	$persembe = 4, 11, 18, 25$
cuma: cuma gününe denk gelen günler kümesi	$cuma = 5, 12, 19, 26$
k: Vardiya indeksi	$k = 1, 2, \dots, t$
t: Vardiya sayısı	$t = 3$
W_k : k. vardiyanın çalışma süresi	$k = 1, 2, \dots, t \quad W_1 = 8 \quad W_2 = 16 \quad W_3 = 24$

4.1.5. Karar değişkenleri ve sapma değişkenleri (Decision variables and deviation variables)

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & i. \text{ hemşire } j. \text{ günde } k. \text{ vardiyaya atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, t$$

- $d1_i^+$: i. hemşire için birinci vardiya hedefinden pozitif sapma değeri
 $d1_i^-$: i. hemşire için birinci vardiya hedefinden negatif sapma değeri
 $d2_i^+$: i. hemşire için ikinci vardiya hedefinden pozitif sapma değeri
 $d2_i^-$: i. hemşire için ikinci vardiya hedefinden negatif sapma değeri
 $d3_i^+$: i. hemşire için haftasonu üçüncü vardiya hedefinden pozitif sapma değeri
 $d3_i^-$: i. hemşire için haftasonu üçüncü vardiya hedefinden negatif sapma değeri
 $d4_i^+$: i. hemşire için haftasonu günlerinin yetkinlik hedefinden pozitif sapma değeri
 $d4_i^-$: i. hemşire için haftasonu günlerinin yetkinlik hedefinden negatif sapma değeri

4.1.6. Matematiksel modelin amaç fonksiyonu ve kısıtları (Objective function and constraints of the mathematical model)

İki adet hedef kısıtı bulunan model aşağıda gösterilmiştir.

Kısıt 1: Herhangi bir hemşire hafta içi üç vardiyadan sadece birinde bulunmalıdır. Böylece gün içinde sadece bir vardiyaya atanma sağlanmaktadır.

$$\sum_{k=1}^t X_{ijk} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \forall j \in hi \quad (5)$$

Kısıt 2: Her vardiya için gerekli hemşire sayısı karşılanmalıdır. Her vardiyaya talep edilen sayıda personelin atanmasını mümkün kılan kısıttır.

Hafta içi ihtiyaç duyulan hemşire sayısı:

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \geq 4 \quad \forall j \in hi \quad k = 1,2 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \leq 5 \quad \forall j \in hi \quad k = 1,2 \quad (7)$$

Hafta sonu ihtiyaç duyulan hemşire sayısı:

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \geq 3 \quad \forall j \in hs \quad k = 3 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \leq 4 \quad \forall j \in hs \quad k = 3 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} = 0 \quad \forall j \in hs \quad k = 1,2 \quad (10)$$

Kısıt 3: Her hemşire ayda en az 160 saat çalışmalıdır. Hastane kuralının yerine getirilmesi gereken sert kısıttır.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^3 (W_1 X_{ijk} + W_2 X_{ijk} + W_3 X_{ijk}) \geq 160 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Kısıt 4: Her hemşire ayda en fazla 180 saat çalışmalıdır. Hastane kuralının yerine getirilmesi gereken sert kısıttır.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^3 (W_1 X_{ijk} + W_2 X_{ijk} + W_3 X_{ijk}) \leq 180 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

Kısıt 5: Her hemşire ardışık en fazla 24 saat çalışabilir. Personelin verimli olabileceği ve iş, kişisel yaşam kalitesini düşürmeyeceği maksimum saat sınırında atama yapılması kısıttır.

$$W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2} + W_3 X_{ij3} + W_1 X_{i(j+1)1} + W_2 X_{i(j+1)2} + W_3 X_{i(j+1)3} \leq 24 \\ i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m-1 \quad (13)$$

Kısıt 6: Herhangi bir hemşire, herhangi bir günde gece vardiyasına atanmışsa bir sonraki günün gündüz ve gece vardiyasına atanmamalıdır. 16 saatlik gece vardiyalarından sonra 24 saatlik bir dinlenme payı ile hemşirelerin memnuniyetinin amaçlandığı kısıttır.

$$X_{ij2} + X_{i(j+1)1} + X_{i(j+1)2} + X_{i(j+1)3} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, (m-1) \quad (14)$$

Kısıt 7: Tam gün vardiyasına atanan hemşireler ertesi gün herhangi bir vardiyaya atanmamalıdır. Personelin 24 saatlik çalışmasından sonra en az 24 saatlik izin hakediş kısıttır.

$$X_{ij3} + X_{i(j+1)1} + X_{i(j+1)2} + X_{i(j+1)3} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, (m-1) \quad (15)$$

Kısıt 8: Her vardiyada en fazla bir tane öğrenci olması istenmektedir. (3 ve 8 numaralı hemşireler stajyer) Yoğun bakımda kritik durumdaki hastaların takibi sırasında oluşabilecek riskleri doğru bir kriz yönetimi ile karşılamak amaçlı istenmektedir.

$$X_{3jk} + X_{8jk} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, t \quad (16)$$

Kısıt 9: Her hemşire art arda en fazla 3 gün çalışabilir. Personellerin vardiyaya atamalarının eşit ve dengeli olması amaçlanmıştır.

$$x_{ijk} + x_{i(j+1)k} + x_{i(j+2)k} + x_{i(j+3)k} \leq 3 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, (m-3) \quad k = 1, 2, 3 \quad (17)$$

Kısıt 10: Her hemşire ayda en az 5 gün gündüz vardiyasına, en az 3 gün gece vardiyasına ve en fazla 4 gün tam gün vardiyasına, atanmalıdır.

$$\sum_{j \in hi} X_{ij1} \geq 5 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$\sum_{j \in hi} X_{ij2} \geq 3 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij3} \leq 4 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

Hemşire Özel İzin İstekleri

Kısıt 11: 1 numaralı hemşire perşembe ve cuma günleri sadece gündüz vardiyasına atanmalıdır. Perşembe ve cuma günleri akşamları evde hasta bakımına gitmektedir.

$$X_{1jk} = 0 \quad \forall j \in persembe \quad k = 2,3 \quad (21)$$

$$X_{1jk} = 0 \quad \forall j \in cuma \quad k = 2,3 \quad (22)$$

Kısıt 12: Hemşireler yıllık izne ayrıldığı günlerde çalışmamalıdır. Yıllık izin isteklerinin dikkate alındığı kısıtlarda hemşire numaraları ve izin alacakları günler aşağıda verilmektedir.

3 numaralı hemşire 11. günde yıllık izne ayrıldığı için çalışmamalıdır.

$$X_{311k} = 0 \quad k = 1,2,3 \quad (23)$$

3 numaralı hemşire 16. ve 18. günler arasında yıllık izne ayrıldığı için çalışmamalıdır.

$$X_{3jk} = 0 \quad j = 16, 17, 18 \quad k = 1,2,3 \quad (24)$$

11 numaralı hemşire 9. ve 10. günler arasında yıllık izne ayrıldığı için çalışmamalıdır.

$$X_{11jk} = 0 \quad j = 9, 10 \quad k = 1,2,3 \quad (25)$$

Hedef Kısıtları: Modelde personel yeterliliklerini ve eşit iş yükü dağılımını dikkate alan toplamda 2 adet hedef bulunmaktadır.

Hedef Kısıtı 1: Hemşirelerin toplam vardiya atamaları mümkün olduğunca eşit ve dengeli şekilde dağıtılmalıdır.

$$\sum_{j=1}^m (X_{ij1} - X_{(i+1)j1}) + d 1_i^- - d 1_i^+ = 0 \quad i = 1, 2, \dots (n - 1) \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^m (X_{ij2} - X_{(i+1)j2}) + d 2_i^- - d 2_i^+ = 0 \quad i = 1, 2, \dots (n - 1) \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^m (X_{ij3} - X_{(i+1)j3}) + d 3_i^- - d 3_i^+ = 0 \quad i = 1, 2, \dots (n - 1) \quad (28)$$

(i). hemşirenin (i+1). hemşire ile gündüz, gece, tam gün vardiyalarının farkının 0a eşit olması hedefi ile her bir vardiya bazında, hemşirelerin eşit vardiya sayısında çalışmalarını sağlayacaktır. Böylece çizelgeleme dağılımında daha dengeli bir atama olacaktır.

Hedef Kısıtı 2: Hafta sonu vardiyalarında 10-18 numaralı tecrübeli hemşirelerden sadece birinin olması istenmektedir. Hafta sonu vardiyaları hastanedeki personel eksikliği bakımından ve 24 saat olması sebebi ile hemşirelere daha fazla sorumluluk düşen vardiyalardır. Kritik konumdaki hasta takibi ve kriz yönetimi bakımından tecrübeli hemşirelerin hafta sonu vardiyalarına atanması hedeflenmektedir.

$$\sum_{i=10}^{18} X_{ij3} + d 4_j^- - d 4_j^+ = 1 \quad \forall j \in hs \quad (29)$$

Modelin amaç fonksiyonu ise hemşirelerin toplam vardiya atamalarının ve tecrübeli hemşirelerin hafta sonu vardiya atamalarının mümkün olduğunca eşit ve dengeli şekilde dağıtılmasıdır.

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^n (d1_i^- + d1_i^+ + d2_i^- + d2_i^+ + d3_i^- + d3_i^+) + \sum_{j \in hs} d 4_j^-$$

Elde edilen çözüme göre oluşturulan Ek A'da yer alan çizelge incelendiğinde hemşirelerin aylık olarak vardiya sayıları eşit görünüyorsa da haftalık incelendiğinde iş yükünde dengesizlikler görülmektedir. Çizelgede bir hemşire için haftalık olarak 24 saat çalışma saati görülebiliyorken, diğer hemşirelerde bu süre 48 hatta 64 saatlere kadar çıktığı görülmektedir. Haftalık 40-45 saatin üzerinde çalışma durumu, personellerin dengeli bir çalışma sistemine sahip olmadığını göstermektedir. Bu yüzden hemşire bazında aylık vardiya sayısının yanı sıra haftalık olarak dengeli olabilecek bir vardiya çalışma sistemi için iyileştirme gerekmektedir.

4.2. Yeni Model Önerisi (New Model Proposal)

0-1 HP yöntemi kullanılarak çözülen matematiksel model ile mevcut durum için uygun bir çözüm elde edilmiştir. Ancak 24 saat gibi uzun süreli vardiyalarda personelin tam kapasite çalışması insani olarak mümkün değilken 24 saatlik vardiyalar sonrasında ise hayatlarını idame ettirebilmeleri de oldukça zordur. 3. basamak nöroloji yoğun bakım ünitesi gibi hasta takibinin riskli olduğu bölümlerde ise 24 saatlik vardiyalar nedeniyle hastalara yanlış uygulamalar yapılabilmekte ve sonuçları sakatlık ölüm gibi istenmeyen şekillerde sonuçlanabilmektedir.

Bu durumun önüne geçmek amacıyla hastanede uygulanan vardiya sistemi (gündüz 8 saat, gece 16 saat ve tam gün 24 saat) yerine iki vardiyalı (gündüz 8 saat ve gece 16 saat) sisteme geçilmesi önerilmiş ve yapılan iyileştirme sonucunda daha uygun planlamaların yapılabileceği tespit edilmiştir. Karar değişkenleri aynı olup değişen parametreler 4.2.1 bölümünde verilmiştir.

4.2.1. Parametreler (Parameters)

k: Vardiya indeksi

k = 1, 2, ... t

t: Vardiya sayısı

t = 2

W_k : k. vardiyanın çalışma süresi

k = 1, 2, ... t $W_1 = 8$ $W_2 = 16$

4.2.2. Sapma değişkenleri (Deviation variables)

- $d1_i^+$: *i. hemşire için birinci vardiya hedefinden pozitif sapma değeri*
 $d1_i^-$: *i. hemşire için birinci vardiya hedefinden negatif sapma değeri*
 $d2_i^+$: *i. hemşire için ikinci vardiya hedefinden pozitif sapma değeri*
 $d2_i^-$: *i. hemşire için ikinci vardiya hedefinden negatif sapma değeri*
 $d3_i^+$: *i. hemşire için haftasonu birinci vardiyanın yetkinlik hedefinden pozitif sapma değeri*
 $d3_i^-$: *i. hemşire için haftasonu birinci vardiyanın yetkinlik hedefinden negatif sapma değeri*
 $d4_i^+$: *i. hemşire için haftasonu ikinci vardiyanın yetkinlik hedefinden pozitif sapma değeri*
 $d4_i^-$: *i. hemşire için haftasonu ikinci vardiyanın yetkinlik hedefinden negatif sapma değeri*

4.2.3. Önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu ve kısıtları (Objective function and constraints of the proposed mathematical model)

İki adet hedef kısıtı bulunan modelin amaç fonksiyonu aşağıda gösterilmiştir. Bu bölümdeki amaç hemşirelerin toplam vardiya atamalarının ve tecrübeli hemşirelerin hafta sonu vardiya atamalarının mümkün olduğunca eşit ve dengeli şekilde dağıtılmasıdır.

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^n (d1_i^- + d1_i^+ + d2_i^- + d2_i^+) + \sum_{j \in hs} (d3_j^- + d4_j^-)$$

Kısıtlar: Modelin dokuz kısıtı aşağıda açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

Kısıt 1: Herhangi bir hemşire iki vardiyadan sadece birinde bulunmalıdır.

$$\sum_{k=1}^t X_{ijk} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (30)$$

Kısıt 2: Her vardiya için gerekli hemşire sayısı karşılanmalıdır.

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \geq 4 \quad \forall j \in hi \quad k = 1, 2 \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \leq 5 \quad \forall j \in hi \quad k = 1, 2 \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \geq 3 \quad \forall j \in hs \quad k = 1, 2 \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} \leq 4 \quad \forall j \in hs \quad k = 1, 2 \quad (34)$$

Kısıt 3: Her hemşire haftada en az 40 saat çalışmalıdır.

$$\sum_{j=1}^7 (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \geq 40 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (35)$$

$$\sum_{j=8}^{14} (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \geq 40 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (36)$$

$$\sum_{j=15}^{21} (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \geq 40 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (37)$$

$$\sum_{j=22}^{28} (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \geq 40 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (38)$$

Kısıt 4: Her hemşire haftada en fazla 45 saat çalışmalıdır.

$$\sum_{j=1}^7 (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \leq 45 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (39)$$

$$\sum_{j=8}^{14} (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \leq 45 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (40)$$

$$\sum_{j=15}^{21} (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \leq 45 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (41)$$

$$\sum_{j=22}^{28} (W_1 X_{ij1} + W_2 X_{ij2}) \leq 45 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

Kısıt 5: Herhangi bir hemşire, herhangi bir günde gece vardiyasına atanmışsa bir sonraki günün gündüz ve gece vardiyasına atanmamalıdır.

$$X_{ij2} + X_{i(j+1)1} + X_{i(j+1)2} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, (m-1) \quad (43)$$

Kısıt 6: Her vardiyada en fazla bir tane öğrenci olması istenmektedir. (3 ve 8 numaralı hemşireler stajyer)

$$X_{3jk} + X_{8jk} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2 \quad (44)$$

Kısıt 7: Her hemşire art arda en fazla 3 gün çalışabilir.

$$x_{ijk} + x_{i(j+1)k} + x_{i(j+2)k} + x_{i(j+3)k} \leq 3 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, (m-3) \quad k = 1, 2 \quad (45)$$

Hemşire Özel İzin İstekleri

Kısıt 8: 1 numaralı hemşire perşembe ve cuma günleri sadece gündüz vardiyasına atanmalıdır.

Perşembe ve cuma günleri akşamları evde hasta bakımına gitmektedir.

$$X_{1j2} = 0 \quad \forall j \in \text{perşembe} \quad (46)$$

$$X_{1j2} = 0 \quad \forall j \in \text{cuma} \quad (47)$$

Kısıt 9: Hemşireler yıllık izne ayrıldığı günlerde çalışmamalıdır. Yıllık izin isteklerinin dikkate alındığı kısıtlarda hemşire numaraları ve izin alacakları günler aşağıda verilmektedir.

$$X_{3,11,k} = 0 \quad k = 1,2 \quad (48)$$

$$X_{3,jk} = 0 \quad j = 16,17,18 \quad k = 1,2 \quad (49)$$

$$X_{11,jk} = 0 \quad j = 9,10 \quad k = 1,2 \quad (50)$$

Hedef Kısıtları: Modelde personel yeterliliklerini ve eşit iş yükü dağılımını dikkate alan toplamda 2 adet hedef bulunmaktadır.

Hedef Kısıtı 1: Hemşirelerin toplam vardiya atamaları mümkün olduğunca eşit ve dengeli şekilde dağıtılmalıdır.

$$\sum_{j=1}^m (X_{ij1} - X_{(i+1)j1}) + d 1_i^- - d 1_i^+ = 0 \quad i = 1, 2, \dots (n-1) \quad (51)$$

$$\sum_{j=1}^m (X_{ij2} - X_{(i+1)j2}) + d 2_i^- - d 2_i^+ = 0 \quad i = 1, 2, \dots (n-1) \quad (52)$$

Hedef Kısıtı 2: Hafta sonu vardiyalarında 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 numaralı tecrübeli hemşirelerden en az birinin olması istenmektedir. Kritik konumdaki hasta takibi ve kriz yönetimi bakımından tecrübeli hemşirelerin hafta sonu vardiyalarına atanması hedeflenmektedir.

$$\sum_{i=10}^{18} X_{ij1} + d 3_j^- - d 3_j^+ = 1 \quad \forall j \in hs \quad (53)$$

$$\sum_{i=10}^{18} X_{ij2} + d 4_j^- - d 4_j^+ = 1 \quad \forall j \in hs \quad (54)$$

Önerilen model ile elde edilen çözüme göre oluşturulan Ek B'de yer alan çizelge incelendiğinde aylık olarak çalışma saatlerinin yanı sıra haftalık olarak da dengeli bir atama yapıldığı görülmektedir. 48, 56, 64 gibi haftalık çalışma saatlerini (40-45) aşan süreler yapılan iyileştirmeler sayesinde hemşire başına haftalık 40 saate indirgenmiştir. Önerilen model ile düzenlenen çizelgenin daha adil ve dengeli bir dağılım sağlamış olduğu görülmektedir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Sağlık sektöründe hastalara verilen hizmetin de en iyi şekilde yerine getirilebilmesi ve içinde bulunduğumuz pandemi sürecinin kontrol altına alınması için yapılan çalışmaların doğru ve etkili bir şekilde yürütülebilmesinde hemşirelerin rolü son derece önemlidir. Hemşirelerin ise daha verimli çalışabilmek için etkin bir çalışma çizelgesine ihtiyaçları vardır. Hemşire çizelgeleme problemleri; hastane kuralları, personel istekleri, maliyet, hasta ve hasta yakınları istekleri gibi birçok etken altında her hedefin gerçekleşmesinin sağlanması ve aynı zamanda adil ve dengeli bir şekilde personel ataması yapılması açısından gittikçe karmaşıklaşabilecek problemlerdir.

Bu çalışmada, sağlık personeli çalışma yönetmeliği, hastane kuralları, personel yeterlilikleri, hemşire özel izin istekleri ele alınarak bir hemşire çizelgesi oluşturulmuş ve sonuç üzerinden iyileştirme çalışmalarında bulunmak amacıyla yeni bir model önerisi sunulmuştur. Vardiya atamalarına yeni bir düzenleme getirilmiş ve çalışma sistemi her hemşire için haftalık çalışma saati bazında eşit ve adil olunması sağlanmıştır. İyileştirilmiş yeni model sayesinde özellikle de pandemi gibi olağanüstü hal teşkil eden ve yoğun çalışma temposu gerektirecek, durumlar söz konusu olduğunda hemşirelerin dengeli atamaları ile daha uygun koşullar oluşmuş olacaktır.

Hemşire özel izin isteklerini dikkate alarak motivasyon artırılması ve buna bağlı olarak hizmet kalitesinin de artması planlanmaktadır; yoğun bakım ünitesindeki durumu kritik olan hastaların takibinin daha iyi sağlanabilmesi için de vardiya atamalarında personel tecrübeleri göz önüne alınmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak hastanenin 3. basamak nöroloji yoğun bakımı ünitesi için 18 hemşirenin atamaları HP yöntemi ile yapılarak adil ve dengeli bir çizelge oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise 24 saatlik vardiyaların neden olduğu yanlış uygulamaların ve istenmeyen sonuçların önüne geçmek amacıyla iki vardiyalı sisteme geçilmesi önerilmiştir. Önerilen yeni sistemde aylık olarak çalışılması gereken toplam vardiya saati, haftalık olarak en az 40 en fazla 45 saat olarak her haftaya eşit şekilde dağıtılmış ve çizelgede daha dengeli atamalar gerçekleştirilmiştir. Personel planlama ve hastane yönetim

süreci uygulamalarının iyileştirilmesinde de rol oynayabilecek bu öneri hemşire çizelgeleme problemine yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Ancak 24 saat gibi uzun süreli vardiyalarda personelin tam kapasite çalışması insani olarak mümkün değilken 24 saatlik vardiyalar sonrasında ise hayatlarını idame ettirebilmeleri de oldukça zordur. 3. basamak nöroloji yoğun bakım ünitesi gibi hasta takibinin riskli olduğu bölümlerde ise 24 saatlik vardiyalar nedeniyle hastalara yanlış uygulamalar yapılabilmekte ve sonuçları sakatlık ölüm gibi istenmeyen şekillerde sonuçlanabilmektedir.

Günümüzde çizelgeleme alanında yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Hizmet sistemlerinde ve sağlık alanında hemşire çizelgeleme üzerine de çalışma alanı fazla olduğundan farklı özel kısıtlar ve farklı modeller ile de problemler ele alınmıştır. Çalışmada hem hastane hem personel hem de hasta bakış açısından ilerlenen bir model oluşturulmuştur. Hastanenin mevcut durum modeli ile oluşturulan çizelgenin daha adil bir çizelge olabilmesi için yapılan vardiya atama iyileştirmeleri ile yeni model önerisi, literatürde yapılacak iyileştirme çalışmaları için fikir oluşturmada yardımcı olacaktır.

İleride yapılacak projelerde önerilen bu model diğer servislere uyarlanabilir. Bunun dışında vardiya sisteminde farklı değişiklikler yapılarak yeni model önerisinde bulunulabilir. hemşire çizelgelerinin oluşturulması için uygulanabilir. Bununla birlikte, çizelgenin hızlı bir şekilde elde edilmesi için önerilen modeller karar destek sistemleri ile desteklenebilir.

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 kaldığını ve makalenin özgün olduğunu beyan eder.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Bu çalışmada yazarların katkıları şu şekildedir: Literatür araştırması: Müberra Koçak, Gizem Ekren, Rabia Yumuşak; Problemin tanımlanması: Müberra Koçak, Gizem Ekren, Prof. Dr. Tamer Eren; Modelleme: Müberra Koçak, Gizem Ekren, Doç. Dr. Hacı Mehmet Alakaş; Modelin çözümü: Müberra Koçak, Gizem Ekren, Rabia Yumuşak; Çözümün yorumlanması: Prof. Dr. Tamer Eren, Doç. Dr. Hacı Mehmet Alakaş; Yazım ve yazım denetlemesi: Müberra Koçak, Gizem Ekren, Rabia Yumuşak, Doç. Dr. Hacı Mehmet Alakaş, Prof. Dr. Tamer Eren.

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 kullanılabilirliğini ifade etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S.D. Karayel ve E. Atmaca, "Özel bir hastane için hemşire çizelgeleme problemi". *Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi*, Vol. 21, No. 2, pp. 111-132, 2017.

- [2] M.S. Aktürk, E. Varlı and T. Eren, "Tam gün vardiyalı ve özel izin istekli hemşire çizelgeleme probleminin hedef programlama ile çözümü". *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Vol 7, No. 2, pp. 1-16, 2017.
- [3] E. Geçici ve M.G. Güler, "Hemşire çizelgeleme problemi için bir karar destek sistemi uygulaması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 26, No. 4, pp. 749-757, 2020.
- [4] M. Tohidi, M. Kazemi Zanjani, and I. Contreras, "Integrated physician and clinic scheduling in ambulatory polyclinics." *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 70, No. 2, pp. 177-191, 2018.
- [5] P. Damcı-Kurt, M. Zhang, B. Marentay, and N. Govind, "Improving physician schedules by leveraging equalization: Cases from hospitals in US," *Omega*, Vol. 85, June, pp. 182-193, 2018.
- [6] G. Leefink, and E. W. Hans. "Case mix classification and a benchmark set for surgery scheduling". *Journal of scheduling*, Vol. 21, No. 1, pp. 17-33, 2018.
- [7] A. Al-Refaie, T. Chen, and M. Judeh. "Optimal operating room scheduling for normal and unexpected events in a smart hospital". *Operational Research*, vol. 18, No. 3, pp.579-602, 2018.
- [8] H. Liu, T. Zhang, S. Luo, and D. Xu, "Operating room scheduling and surgeon assignment problem under surgery durations uncertainty". *Technology and Health Care*, Vol. 26 No. 2, pp.297-304, 2018.
- [9] Ş. Gür and T. Eren, "Application of Operational Research Techniques in Operating Room Scheduling Problems: Literature Overview" *Journal of Healthcare Engineering*, Volume 2018, pp. 1-15, 2018.
- [10] W. Y. Wang, D. Gupta, and S. Potthoff, "On evaluating the impact of flexibility enhancing strategies on the performance of nurse schedules". *Health policy*, Vol. 93 No.2-3, pp. 188-200, 2009.
- [11] F. C. Coelli, R. B. Ferreira, R. M. V. Almeida, and W. C. A. Pereira, "Computer simulation and discrete-event models in the analysis of a mammography clinic patient flow." *Computer methods and programs in biomedicine*, Vol. 87, No.3, pp. 201-207, 2007.
- [12] N. Al-Hinai, N. Al-Yazidy, A. Al-Hooti, and E. Al-Shereiqi, (2018, January). "A goal programming model for nurse scheduling at emergency department." In 8th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM Society, pp. 99-103, 2018.
- [13] E. A. Aktunc and E. Tekin, "Nurse Scheduling with Shift Preferences in a Surgical Suite Using Goal Programming." In *Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era* Springer, Cham., pp. 23-36, 2018.
- [14] J. Kim, W. Jeon, Y. W. Ko, S. Uhm and D. H. Kim, "Genetic Local Search for Nurse Scheduling Problem" *Advanced Science Letters*, Vol.24 No.1, pp. 608-612, 2018.
- [15] M. Moz, and M. V. Pato, "Solving the problem of rostering nurse schedules with hard constraints: new multicommodity flow models." *Annals of Operations Research*, Vol. 128 No.1-4, pp. 179-197, 2004.
- [16] E. K. Burke, P. De Causmaecker, G. V. Berghe and H. Van Landeghem, "The state of the art of nurse rostering." *Journal of Scheduling*, Vol. 7 No.6, pp. 441-499, 2004.
- [17] M.N. Azaiez and S.S. Al Sharif, "A 0-1 goal programming model for nurse scheduling". *Computers & Operations Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 491-507, 2005.
- [18] L. Trilling, A. Guinet and D. LeMagny, "Nurse scheduling using integer linear programming and constraint programming". *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 39, No. 3, pp. 671-676, 2006.
- [19] C. C. Tsai and C. J. Lee, "Optimization of nurse scheduling problem with a two-stage mathematical programming model." *Asia Pacific Management Review*, 15(4), 503-516, 2010.
- [20] E.K. Burke, J., Li, and R. Qu, "A hybrid model of integer programming and variable neighbourhood search for highly-constrained nurse rostering problems". *European Journal of Operational Research*, Vol. 203, No. 2, pp. 484-493, 2010.
- [21] S. Topaloğlu, and H. Selim, "Nurse scheduling using fuzzy modeling approach." *Fuzzy sets and systems*, Vol.161 No.11, pp. 1543-1563, 2010.

- [22] W. K. Zen-El-Din, M. S. Kamel and Mohamed, A. S., "A binary integer programming for nurse scheduling." In Biomedical Engineering Conference (CIBEC), Cairo International pp. 122-125, IEEE December 2012.
- [23] N. Bağ, N. M. Özdemir ve T. Eren, "0-1 Hedef programlama ve ANP yöntemi ile hemşire çizelgeleme problemi çözümü." *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 4 No.1, pp. 2-6, 2012.
- [24] E. Varlı ve T. Eren, "Hemşire çizelgeleme problemi ve hastanede bir uygulama" *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 5, No. 1, pp. 34-40, 2017.
- [25] E. Varlı, B. Ergişi ve T. Eren, "Özel kısıtlı hemşire çizelgeleme problemi: hedef programlama yaklaşımı". *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Vol. 49, pp. 189-206, 2017.
- [26] A. J. Mason and M. C. Smith, "A nested column generator for solving rostering problems with integer programming." In International conference on optimisation: techniques and applications. Curtin University of Technology Perth, Australia, pp. 827-834, July 1998.
- [27] B. Maenhout, and M. Vanhoucke, "Branching strategies in a branch-and-price approach for a multiple objective nurse scheduling problem." *Journal of scheduling*, Vol.13 No.1, pp. 77-93, 2010.
- [28] A. Legrain, H. Bouarab and N. Lahrichi, "The nurse scheduling problem in real-life." *Journal of medical systems*, Vol. 39 No.1, pp. 1-11, 2015.
- [29] D. Santos, P. Fernandes, H. L. Cardoso, and E. Oliveira, "A weighted constraint optimization approach to the nurse scheduling problem." In 2015 IEEE 18th International Conference on Computational Science and Engineering pp. 233-239, October 2015.
- [30] S. Ceschia, N. Dang, P. De Causmaecker, S. Haspeslagh, and A. Schaerf, "The second international nurse rostering competition." *Annals of Operations Research*, Vol.274 No.1, pp.171-186, 2019.
- [31] J. Inafune, S. Watanabe and M. Okudera, New approach combining branch and price with metaheuristics to solve nurse scheduling problem. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 21 No.7, 1251-1261, 2017.
- [32] E. K. Burke, and T. Curtois, "New approaches to nurse rostering benchmark instances." *European Journal of Operational Research*, Vol. 237 No. 1, pp. 71-81, 2014.
- [33] X. Zhong, J. Zhang, and X. Zhang, "A two-stage heuristic algorithm for the nurse scheduling problem with fairness objective on weekend workload under different shift designs." *IIEE transactions on healthcare systems engineering*, Vol.7 No. 4, pp. 224-235, 2017.
- [34] E. Özcan, T. Danişan, R. Yumuşak, Ş. Gür and T. Eren, "Goal programming approach for the radiology technician scheduling problem". *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. Vol. 37, No. 4, pp. 1410-1420, 2019.
- [35] J. F. Bard and H. W. Purnomo, "A column generation-based approach to solve the preference scheduling problem for nurses with downgrading." *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol.39 No.3, pp. 193-213, 2005.
- [36] P. Eveborn and M. Rönnqvist, "Scheduler—a system for staff planning." *Annals of Operations Research*, Vol.128 No.1, pp. 21-45, 2004.
- [37] F. He and R. Qu, A constraint programming based column generation approach to nurse rostering problems. *Computers & Operations Research*, Vol. 39 No. 12, pp. 3331-3343, 2012.
- [38] K. Leksakul and S. Phetsawat, "Nurse scheduling using genetic algorithm." *Mathematical Problems in Engineering*, Vol.2014, pp. 1-16, 2014.
- [39] G. J. Lim, A. Mobasher, J. F. Bard, and A. Najjarbashi, Nurse scheduling with lunch break assignments in operating suites. *Operations Research for Health Care*, Vol.10, pp. 35-48, 2016.
- [40] B. Jaumard, F. Semet and T. Vovor, "A generalized linear programming model for nurse scheduling." *European journal of operational research*, Vol.107 No. 1, 1-18, 1998.
- [41] G. Lim and A. Mobasher, "Nurse scheduling problem in an operating suite." In IIE Annual Conference. Proceedings (p. 1). Institute of Industrial and Systems Engineers (IIESE), 2011.

- [42] J. Guo and J. F. Bard, "A column generation-based algorithm for midterm nurse scheduling with specialized constraints, preference considerations, and overtime." *Computers & Operations Research*, Vol. 138, pp. 105597, 2022.
- [43] H. W. Purnomo and J. F. Bard, "Cyclic preference scheduling for nurses using branch and price." *Naval Research Logistics (NRL)*, Vol.54 No.2, pp. 200-220 2007.
- [44] E. Rahimian, K. Akartunalı, and J. Levine, "A hybrid integer and constraint programming approach to solve nurse rostering problems." *Computers & Operations Research*, Vol.82, pp. 83-94, 2017.
- [45] E. Rahimian, K. Akartunalı and J. Levine, "A hybrid integer programming and variable neighbourhood search algorithm to solve nurse rostering problems." *European Journal of Operational Research*, Vol.258 No. 2, pp. 411-423, 2017.
- [46] P. Strandmark, Y. Qu and T. Curtois, "First-order linear programming in a column generation-based heuristic approach to the nurse rostering problem." *Computers & Operations Research*, Vol. 120, pp. 104945, 2020.
- [47] B. Sinha and N. Sen, "Goal programming approach to tea industry of Barak Valley of Assam." *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 5 No.29, pp. 1409-1419, 2011.

Ek A

Mevcut durum için hemşire çizelgesi

Nurse schedule for current situation

1	Gündüz	2	Gece	3	Tam Gün	Günler																												Vardiyalar			Atama Sayısı
																													Gündüz	Gece	Tam Gün						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28									
1	2		2					1	1	2			3		2		1			3		1	1	2								5	5	2	12		
2			2		3			1	2		1	1					1	2				1	2		2			3				5	5	2	12		
3	1	3		1				2		2		2			2					3		2		1	1	1					5	5	2	12			
4		2		1	1			1	2			1	3			2		2		3				1	2						5	5	2	12			
5	1	2		2		3		1	1			2					2		2			1	1	3							5	5	2	12			
6		1	2		1			1	2					3		2			2		3		1	1	2						5	5	2	12			
7		1	1	3				2		2					1	1	1		2					2		2		3			5	5	2	12			
8	2		2		2				1	1			3			1			1		3		1	2		2					5	5	2	12			
9		2			1			2			1	2			1	1	2						1	2		3		3			5	5	2	12			
10	2		1	1				2		1	2				1			2			3		2			1	3				5	5	2	12			
11	2		1	2		3					2				2		1	3				1	2		1	1					5	5	2	12			
12		1	1		2			2		2		1	3			1	2		1	3		2									5	5	2	12			
13	2			2						1	2				1	2		1	1		3		2		1		3				5	5	2	12			
14	1		2		2		3		2		1	2			1	3		1	1						2						5	5	2	12			
15	1		1		2		3			2		1		3		2		1				2			1	2					5	5	2	12			
16	1	2			2		3			1	1				2		1	1	2				2					3			5	5	2	12			
17				1	1		3		1	1	2			3			2		2			2			1	2					5	5	2	12			
18		1	2		1				1	1	2				2		2		1			3			2		3				5	5	2	12			
Toplam Hemşire Sayısı	10	9	10	9	10	3	4	10	9	10	9	9	4	3	10	9	10	8	10	4	4	9	10	8	10	8	3	4									




Ek B

Önerilen model için hemşire çizelgesi
Nurse Schedule for the proposed model

1		2		Günler																								Vardiyalar		Atama Sayısı					
Gündüz		Gece		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		27	28	Gündüz	Gece	
1	1	1			1	2							2		1		2			2		1	2		2		1			2		6	7	13	
2	2			1	2			1	1			1	2		1	2		2		2		2		2		1	2				6	7	13		
3		2		2		1		2		1		2		2			2			1		2			1	1	2		1		6	7	13		
4	1	2		2						2		2		1			1	2			1	1			2		1	2			6	7	13		
5	2		1	1	1			2		2		1			1	2			2		2		1	2			2			6	7	13			
6		1		1	1		2		1	2		2				2		2		2		1	1			2			2		6	7	13		
7	1	2		2				2		2		1			2		2		2			1	1	1		2			1		6	7	13		
8	2		1				2		2		1		2		1	1		1	2		1	2			1		2		2		6	7	13		
9	2			1	2					2		2			1	2		2		2		1				1	1	1		2		6	7	13	
10			2			1	2		1	1	1		2		1	2			2		2			2		2		1			6	7	13		
11	1	1	1		2			2			2			1		2		1			1			2			2		1	2		6	7	13	
12	2				1	1	1		2		2			1	2			2		2			1	1	2			2			6	7	13		
13		1	2			2					1	2		2			1	2		2		1	2		2		1	2			1	1	6	7	13
14			2		2		1	1		1	2		1		2		1	2			1	2			2		2		1			6	7	13	
15	1	2				2		1		2		2			1	1				1	2			1	2		2			1		2	6	7	13
16			2		1		2			1		2		2			1	1		1	2				1	2		2		1		2	6	7	13
17			1	2		2		2			1		2		2		1	2								1	2		1	1		6	7	13	
18		2		2			1	1	1				1	2		2		2		1			2			2		1		2		6	7	13	
Toplam Hemşire Sayısı	10	9	8	9	9	7	7	9	8	9	9	9	9	7	7	9	9	9	9	9	9	9	6	7	8	10	9	9	9	9	7	7			



YÜKSEK MERTEBE KAYMA DEFORMASYON TEORİSİNE DAYALI POROZ ORTOTROPİK TABAKALI PLAKLARIN BURUKULMA ANALİZİ

¹Ferruh TURAN , ²Suna ULU , ³Yıldız ÜNAL 




Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE
¹ferruh.turan@omu.edu.tr, ²sunaulu001@gmail.com, ³unalyildiz2808@gmail.com

Önemli Katkılar (Highlights)

- Hiperbolik kayma deformasyon teorisi kapsamında poroz ortotropik tabakalı plakların stabilitesi incelendi.
- Poroz ortotropik tabakalı plak tabaka kalınlıkları boyunca üç farklı kosinüs fonksiyonu kullanılarak modellendi.
- Kayma deformasyonun, porozitenin, ortotropinin, yükleme faktörlerinin ve geometrik özelliklerin poroz kompozit plakların kritik burkulma yüküne etkileri araştırıldı.
- Porozite varlığının tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerlerini azalttığı sonucu elde edildi.



YÜKSEK MERTEBE KAYMA DEFORMASYON TEORİSİNE DAYALI POROZ ORTOTROPİK TABAKALI PLAKLARIN BURKULMA ANALİZİ

^{1*}Ferruh TURAN , ²Suna ULU , ³Yıldız ÜNAL 

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE
¹ferruh.turan@omu.edu.tr, ²sunaulu001@gmail.com, ³unalyildiz2808@gmail.com

(Geliş/Received: 12.09.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.03.2023)

ÖZ: Bu çalışmada, yüksek mertebeli kayma deformasyon teorisi kullanılarak poroz ortotropik tabakalı plakların burkulma davranışı araştırılmaktadır. Plak tek ve iki eksenli basınca maruz kaldığı ve plak kalınlığı boyunca özel fonksiyonlarla tanımlanan üç farklı porozite dağılımı dikkate alınmaktadır. Stabilitate denklemleri virtüel iş prensibiyle türetilmektedir ve elde edilen kısmi türevli diferansiyel denklemlere Galerkin yöntemi uygulanarak kritik burkulma yükü ifadesi elde edilmektedir. Türetilen kritik burkulma yükü ifadesiyle elde edilen sonuçlar, literatürdeki uygun sonuçlarla kıyaslanarak doğrulanmaktadır. Kritik burkulma yükünün kayma deformasyonuna, poroziteye, ortotropiye, yükleme faktörüne ve farklı geometrik özelliklere duyarlılığını gözlemlemek için parametrik bir analiz yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Burkulma, Porozite, Poroz Plak, Tabakalı Plak, Kayma Deformasyon Teorisi

Buckling Analysis of Porous Orthotropic Laminated Plates Within Higher-Order Shear Deformation Theory

ABSTRACT: This study investigates the buckling behavior of porous orthotropic laminated plates using high-order shear deformation theory. The plate is under uniaxial and biaxial compressive loadings. Three different porosity distributions defined by specific functions throughout the plate thickness are considered. The stability equations are derived by the virtual work principle, and the critical buckling load relation is obtained by applying the Galerkin method to the partial differential equations obtained. The results obtained with the derived critical buckling load expression are verified by comparing with the appropriate results in the literature. A parametric analysis is performed to observe the sensitivity of the critical buckling load to shear deformation, porosity, orthotropy, loading factor, and different geometric properties.

Keywords: Buckling, Porosity, Porous Plate, Laminated Plate, Shear Deformation Theory

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık, denizcilik, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok sektörde kullanılan malzemelerin yüksek mukavemet/düşük ağırlık özelliklerinin çok iyi olması istenmektedir [1]. Yapı elemanlarının hafif olması, gözenekli veya boşluklu formda üretilmesiyle mümkün olabilmektedir. Bu tür gözenekler, üretim esnasındaki mikro-kusurlardan olabileceği gibi özel sebeplerden ötürü üretim yöntemleriyle de oluşturulabilmektedir. Bu durumda, poroz yapı elemanlarının malzeme özellikleri noktadan noktaya farklılık göstermektedir. Bundan dolayı, bu gözeneklerin veya kusurların yapı elemanının statik ve dinamik davranışları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Önemli bir mühendislik uygulaması olan poroz yapı elemanlarının (plak, kabuk vs.) stabilite davranışlarına olan ilgi giderek artmaktadır. Yapılan birçok çalışmada poroz malzeme özelliklerinin yapı elemanının kalınlığı boyunca özel bir fonksiyona bağlı olarak değiştiği varsayılmaktadır ve porozitenin yapı elemanının burkulma davranışına etkileri araştırılmaktadır [2-11]. Klasik plak teorisinde enine kayma deformasyonları ihmal edilerek problemin çözümünde kolaylık sağlanmaktadır. Ancak, enine

kayma deformasyon etkilerinin yapı elemanlarının statik ve dinamik davranışları üzerindeki etkileri oldukça önemli olmaktadır. Bundan dolayı araştırmacılar yeni kayma deformasyon teorileri için araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmaların birçoğu yüksek mertebeden kayma deformasyon teorilerini kapsamaktadır [12-19]. Bu gelişmelerle birlikte, poroz yapı elemanlarının kayma deformasyon teorisi kapsamındaki burkulma analizi çalışmaları artış göstermiştir [20-27].

Tabakalı kompozit plaklar tek katmanlı klasik plaklara nazaran tabakalar arası süreksizlik, doğrultulara göre rijitlik farklılıkları ve kayma dayanımlarının zayıf olması gibi sebeplerden ötürü farklı problemlerle karşılaşabilmektedir. Farklı tabaka dizileme ve farklı yönlendirme açılarına bağlı olarak da çeşitli yükleme durumlarında farklı davranışlar sergilemektedir. Bu gibi durumların tabakalı kompozit plakların davranışları üzerindeki etkileri yüksek mertebe kayma deformasyon teorileri ve 3B elastisite teorisi kapsamında incelenmiştir [28-30]. Tabakalı kompozit malzemelerin üretimi esnasında meydana gelen mikro-kusurların da incelenmesi ve tabakalı kompozit plakların statik ve dinamik davranışları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu ihtiyaçtan ötürü son yıllarda poroz tabakalı yapı elemanlarının eğilme problemlerinin çözümüne eğilim artmıştır [31-33].

Yapılan literatür araştırması, poroz ortotropik tabakalı plakların stabilite probleminin kayma deformasyon teorisi kapsamında yeterince ele alınmadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, porozitenin ortotropik tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri araştırılmaktadır.

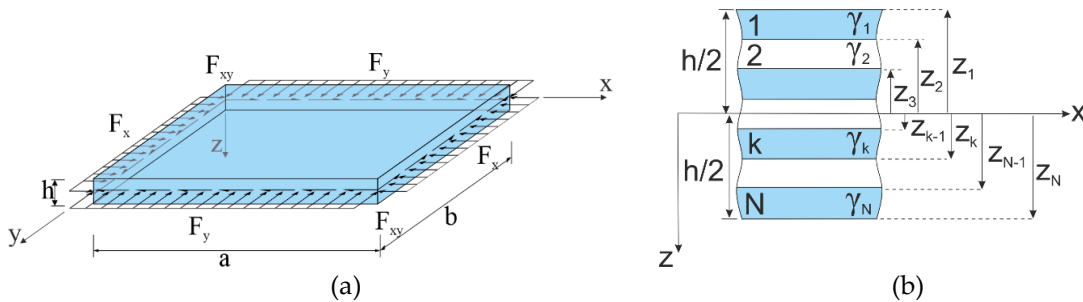
2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Yapı elemanlarının üretimi sırasında teknik hatalardan kaynaklı mikro boşluklar ve porozite meydana gelmektedir. Dolayısıyla, kompozit malzemelerden oluşan yapı elemanlarının içinde var olabilen bu porozitelerin yapı elemanlarının statik ve dinamik davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi önemli ve zorunlu hale gelmektedir. Buna bağlı olarak, bu başlık altında poroz ortotropik tabakalı kompozit plakların temel denklemlerinin türetilmesi sunulmaktadır.

2.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Poroz ortotropik tabakalı kompozit plak, Şekil 1a'da gösterildiği gibi (x, y, z) Kartezyen koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. xy –düzlemi plak orta düzlemi olarak tanımlanmaktadır ve z –ekseni kalınlık doğrultusunu göstermektedir. N tane poroz ortotropik tabakadan meydana gelen plâğın uzunluğu, genişliği ve toplam kalınlığı sırasıyla a , b ve h olarak ifade edilmektedir. Şekil 1b'de gösterilen z –koordinatları, plak kalınlığı içindeki herhangi bir noktanın orta düzleme olan uzaklıklarını tanımlamaktadır. Ayrıca $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$ açıları tabaka yönlendirme açısı adını almaktadır.

Porozitesiz malzemelerin malzeme özellikleri konumdan bağımsız olurken, poroz malzemelerin malzeme özellikleri ise konumun sürekli bir fonksiyonu olarak değişim göstermektedirler. Bu çalışmada, M_1, M_2, M_3 ve M_4 olmak üzere dört tip porozite dağılımı modeli dikkate alınmaktadır.



Şekil 1. Poroz ortotropik tabakalı kompozit plak: (a) yükleme durumu, (b) enkesit detayı

Figure 1. Porous orthotropic laminated composite plate: (a) loading condition, (b) cross-section

Buna bağlı olarak, poroz ortotropik malzemelerden oluşan tabakalı kompozit plakların konuma bağlı malzeme özellikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} \beta_{11}^{(k)}(Z) &= \beta_{01}^{(k)}(1 - \alpha\Delta^{(k)}(Z)), \beta_{22}^{(k)}(Z) = \beta_{02}^{(k)}(1 - \alpha\Delta^{(k)}(Z)), \beta_{12}^{(k)}(Z) = \beta_{012}^{(k)}(1 - \alpha\Delta^{(k)}(Z)), \\ \beta_{13}^{(k)}(Z) &= \beta_{013}^{(k)}(1 - \alpha\Delta^{(k)}(Z)), \beta_{23}^{(k)}(Z) = \beta_{023}^{(k)}(1 - \alpha\Delta^{(k)}(Z)), k = 1, 2, \dots, N, Z = z/h \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $\beta_{01}^{(k)}$ ve $\beta_{02}^{(k)}$ sırasıyla x ve y doğrultularındaki porozitesiz ortotropik malzemenin elastisite modülleridir. $\beta_{012}^{(k)}$, $\beta_{013}^{(k)}$ ve $\beta_{023}^{(k)}$ ise porozitesiz ortotropik malzemenin sırasıyla xy , xz ve yz düzlemlerindeki kayma modülleridir. α porozite katsayısı olup elastisite ve kayma modüllerinin değişimini karakterize etmektedir ve $0 \leq \alpha < 1$ koşulu geçerli olmaktadır. Ayrıca, $\alpha = 0$ olması porozitesiz ortotropik malzeme durumuna (M_4) karşılık gelmektedir. $\Delta^{(k)}(Z)$ ise k . tabakanın porozite değişim fonksiyonu olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\Delta^{(k)}(Z) = \begin{cases} \cos(\pi Z), M_1 \\ \cos(\pi Z/2 + \pi/4), M_2 \\ \cos(|\pi Z| - \pi/2), M_3 \end{cases} \quad (2)$$

Denklem (2)'den de görüleceği üzere, en alt ve en üst noktalarında daha rijit olmak üzere simetrik bir porozite dağılımı (M_1), tabakaların en alt noktalarında daha rijit olmak üzere simetrik olmayan bir porozite dağılımı (M_2) ve tabakaların orta kısımlarında daha rijit olmak üzere simetrik bir porozite dağılımı (M_3) elde edilmektedir.

2.2. Temel Bağntı ve Denklemler (Fundamental Relation and Equations)

Klasik plak teorisi enine kayma gerilmelerini dikkate almamaktadır. Dolayısıyla, enine kayma deformasyonları meydana getiren σ_{xz} ve σ_{yz} kayma gerilmeleri klasik plak teorisine ilave edilmelidir. Buna bağlı olarak, kayma deformasyon plak teorisi kapsamında k . poroz ortotropik tabakanın gerilme – şekil değiştirme bağıntısı [1,19]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \mathfrak{S}_{11} & \mathfrak{S}_{12} & 0 & 0 & \mathfrak{S}_{16} \\ \mathfrak{S}_{21} & \mathfrak{S}_{22} & 0 & 0 & \mathfrak{S}_{26} \\ 0 & 0 & \mathfrak{S}_{44} & \mathfrak{S}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & \mathfrak{S}_{45} & \mathfrak{S}_{55} & 0 \\ \mathfrak{S}_{16} & \mathfrak{S}_{26} & 0 & 0 & \mathfrak{S}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

olarak yazılmaktadır. Burada, ε_x ve ε_y sembolleri tabakalı plağın orta düzlemi üzerinde olmayan herhangi bir noktadaki x ve y doğrultularındaki deformasyon bileşenlerini; ε_{xz} , ε_{yz} ve ε_{xy} sembolleri sırasıyla xz , yz ve xy düzlemlerindeki kayma deformasyon bileşenlerini; $\mathfrak{S}_{ij}^{(k)}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) sembolleri ise k . poroz ortotropik tabakanın dönüştürülmüş malzeme özellikleridir [1,17,18]:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_{11} &= \mathfrak{N}_{11}c^4 + \mathfrak{N}_{22}s^4 + 2(\mathfrak{N}_{12} + 2\mathfrak{N}_{66})s^2c^2, \mathfrak{S}_{12} = (\mathfrak{N}_{11} + \mathfrak{N}_{22} - 4\mathfrak{N}_{66})s^2c^2 + \mathfrak{N}_{12}(s^4 + c^4), \\ \mathfrak{S}_{16} &= (\mathfrak{N}_{11} - \mathfrak{N}_{12} - 2\mathfrak{N}_{66})sc^3 + (\mathfrak{N}_{12} - \mathfrak{N}_{22} + 2\mathfrak{N}_{66})s^3c, \mathfrak{S}_{22} \\ &= \mathfrak{N}_{11}s^4 + \mathfrak{N}_{22}c^4 + 2(\mathfrak{N}_{12} + 2\mathfrak{N}_{66})s^2c^2 \\ \mathfrak{S}_{26} &= (\mathfrak{N}_{11} - \mathfrak{N}_{12} - 2\mathfrak{N}_{66})cs^3 + (\mathfrak{N}_{12} - \mathfrak{N}_{22} + 2\mathfrak{N}_{66})c^3s, \\ \mathfrak{S}_{66} &= (\mathfrak{N}_{11} + \mathfrak{N}_{22} - 2\mathfrak{N}_{12} - 2\mathfrak{N}_{66})c^2s^2 + \mathfrak{N}_{66}(s^4 + c^4) \\ \mathfrak{S}_{44} &= \mathfrak{N}_{44}c^2 + \mathfrak{N}_{55}s^2, \mathfrak{S}_{45} = (\mathfrak{N}_{55} - \mathfrak{N}_{44})cs, \mathfrak{S}_{55} = \mathfrak{N}_{44}s^2 + \mathfrak{N}_{55}c^2, s = \sin \gamma, c = \cos \gamma \end{aligned} \quad (4)$$

Burada, γ açısı global ve lokal x – eksenleri arasındaki açıdır. $\mathfrak{N}_{ij}^{(k)}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) sembolleri k . poroz ortotropik tabakanın malzeme özellikleri olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} \mathfrak{N}_{11}^{(k)}(Z) &= \frac{\beta_{11}^{(k)}(Z)}{1 - v_{12}^{(k)}v_{21}^{(k)}}, \mathfrak{N}_{12}^{(k)}(Z) = \frac{v_{12}^{(k)}\beta_{22}^{(k)}(Z)}{1 - v_{12}^{(k)}v_{21}^{(k)}}, \mathfrak{N}_{21}^{(k)}(Z) = \frac{v_{21}^{(k)}\beta_{11}^{(k)}(Z)}{1 - v_{12}^{(k)}v_{21}^{(k)}}, \mathfrak{N}_{22}^{(k)}(Z) = \frac{\beta_{22}^{(k)}(Z)}{1 - v_{12}^{(k)}v_{21}^{(k)}}, \\ \mathfrak{N}_{44}^{(k)}(Z) &= \beta_{23}^{(k)}(Z), \mathfrak{N}_{55}^{(k)}(Z) = \beta_{13}^{(k)}(Z), \mathfrak{N}_{66}^{(k)}(Z) = \beta_{12}^{(k)}(Z), Z = z/h, k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

Burada, v_{12} ve v_{21} sembolleri poroz ortotropik tabakaların Poisson oranları olup, kalınlık koordinatına göre değişiminin etkisi az olduğundan sabit kabul edilmektedir ve $v_{12}\beta_{22}(Z) = v_{21}\beta_{11}(Z)$ koşulunun sağlandığı varsayılmaktadır.

Poroz ortotropik tabakalı kompozit plakların kayma deformasyon plak teorisi kapsamındaki kuvvet ve moment bileşenlerini bulmak için, klasik plak teorisi için yazılan ifadeler ek olarak enine kesme kuvveti ifadeleri de eklenmelidir. Bu açıklamalar ışığında, bu çalışmadaki probleme uygun olacak şekilde kuvvet ve moment bileşenleri:

$$\begin{aligned} (n_x, n_y, n_{xy}) &= \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{xy}^{(k)}) dz, (m_x, m_y, m_{xy}) = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{xy}^{(k)}) z dz, \\ (s_x, s_y, s_{xy}) &= \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{xy}^{(k)}) \phi(z) dz, (q_x, q_y) = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_{xz}^{(k)}, \sigma_{yz}^{(k)}) \frac{d\phi(z)}{dz} dz \end{aligned} \quad (6)$$

olarak yazılmaktadır. Burada, n kuvvet, m moment, q enine kesme kuvveti ve s yüksek mertebeden kuvvet bileşenlerini temsil etmektedir. Ayrıca burada $\phi(z)$ kayma deformasyon fonksiyonudur. Bu çalışmada, [19] tarafından kullanılan $\phi(z) = \frac{h}{2} \tanh\left(\frac{2z}{h}\right) - \frac{4}{3 \cosh^2(1)} \left(\frac{z^3}{h^2}\right)$ hiperbolik kayma deformasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Denklem (3), Denklem (6)'da yerine yazılıp elde edilen integraller sonuçları virtüel iş prensibinde kullanılırsa poroz ortotropik tabakalı plaka ait aşağıdaki ifadeler elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \eta_{11}^0 + \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \eta_{66}^0 + \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} (\eta_{12}^0 + \eta_{66}^0) - \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \eta_{11}^1 - \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} (\eta_{12}^1 + 2\eta_{66}^1) \\ + \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x^3} \hat{\eta}_{11}^0 + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial x^2 \partial y} (\hat{\eta}_{12}^0 + \hat{\eta}_{66}^0) + \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x \partial y^2} \hat{\eta}_{66}^0 = 0 \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} (\eta_{21}^0 + \eta_{66}^0) + \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} \eta_{66}^0 + \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} \eta_{22}^0 - \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} (\eta_{21}^1 + 2\eta_{66}^1) - \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \eta_{22}^1 \\ + \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x \partial y^2} (\hat{\eta}_{21}^0 + \hat{\eta}_{66}^0) + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial y^3} \hat{\eta}_{22}^0 + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial x^2 \partial y} \hat{\eta}_{66}^0 = 0 \end{aligned} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \eta_{11}^1 + \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} (\eta_{21}^1 + 2\eta_{66}^1) + \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} (\eta_{12}^1 + 2\eta_{66}^1) + \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} \eta_{22}^1 - \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \eta_{11}^2 \\ - \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} (\eta_{12}^2 + \eta_{21}^2 + 4\eta_{66}^2) - \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \eta_{22}^2 + \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x^3} \hat{\eta}_{11}^1 + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial x^2 \partial y} (\hat{\eta}_{12}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1) \\ \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x \partial y^2} (\hat{\eta}_{21}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1) + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial y^3} \hat{\eta}_{22}^1 - F_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2F_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - F_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \end{aligned} \quad (7c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \hat{\eta}_{11}^0 + \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} (\hat{\eta}_{12}^0 + \hat{\eta}_{66}^0) + \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \hat{\eta}_{66}^0 - \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \hat{\eta}_{11}^1 - \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} (\hat{\eta}_{12}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1) \\ + \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x^3} \hat{\eta}_{11}^1 + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial x^2 \partial y} (\hat{\eta}_{12}^1 + \hat{\eta}_{66}^1) + \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x \partial y^2} \hat{\eta}_{66}^1 - \eta_{55}^1 \frac{\partial \chi_x}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (7d)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} (\hat{\eta}_{21}^0 + \hat{\eta}_{66}^0) + \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} \hat{\eta}_{22}^0 + \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} \hat{\eta}_{66}^0 - \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} (\hat{\eta}_{21}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1) - \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \hat{\eta}_{22}^1 \\ + \frac{\partial^3 \chi_x}{\partial x \partial y^2} (\hat{\eta}_{21}^1 + \hat{\eta}_{66}^1) + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial x^2 \partial y} \hat{\eta}_{66}^1 + \frac{\partial^3 \chi_y}{\partial y^3} \hat{\eta}_{22}^1 - \eta_{44}^1 \frac{\partial \chi_y}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (7e)$$

Burada η ve $\hat{\eta}$ terimleri kompozit malzemenin özelliklerine bağlı katsayılar olup açık ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$\eta_{ij}^r = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} (z)^r \mathfrak{S}_{ij}^{(k)} dz, \hat{\eta}_{ij}^r = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} (z)^{2r-r^2} \phi(z)^{0.5(r^2-r+2)} \mathfrak{S}_{ij}^{(k)} dz, i, j = 1, 2, 6; r = 0, 1, 2$$

$$\eta_{ij}^1 = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \left(\frac{d\phi(z)}{dz} \right)^2 \mathfrak{S}_{ij}^{(k)} dz, i, j = 4, 5$$
(7f)

2.3. Çözüm Prosedürü (Solution Procedure)

Tüm kenarlarından basit mesnetli dikdörtgen kompozit plak için aşağıdaki sınır koşulları geçerli olmaktadır:

$$x = 0, a; u = w = \chi_y = 0, \quad y = 0, b; v = w = \chi_x = 0$$
(8)

Denklem (8)'deki sınır koşullarını sağlayan gerekli yaklaşım fonksiyonları:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \cos(\lambda_1 x) \sin(\lambda_2 y) \\ v_1 \sin(\lambda_1 x) \cos(\lambda_2 y) \\ w_1 \sin(\lambda_1 x) \sin(\lambda_2 y) \\ \chi_1 \cos(\lambda_1 x) \sin(\lambda_2 y) \\ \chi_2 \sin(\lambda_1 x) \cos(\lambda_2 y) \end{Bmatrix}, \quad \begin{cases} \lambda_1 = \frac{m_1 \pi}{a} \\ \lambda_2 = \frac{m_2 \pi}{b} \end{cases}$$
(9)

Burada, $u_1, v_1, w_1, \chi_1, \chi_2$ bilinmeyen katsayılarıdır. Denklem (9)'daki yaklaşım fonksiyonları Denklem (7) kısmi türevli diferansiyel denklem sisteminde yerine yazılıp $0 \leq x \leq a$ ve $0 \leq y \leq b$ aralıkları için Galerkin yöntemi uygulanmaktadır. Daha sonra, elde edilen denklem sistemi matris formda yazılıp elde edilen bu matris formun katsayılar matrisinin determinantının sıfıra eşitlenmesiyle poroz ortotropik tabakalı plakların burkulma yükü ifadesi aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\lambda_1^2 F_x + \lambda_2^2 F_y = r_{33} - \frac{r_{31}\psi_{31} + r_{32}\psi_{32} + r_{34}\psi_{34} + r_{35}\psi_{35}}{\psi_{33}}$$
(10)

Burada $r_{3j} (j = 1, 2, \dots, 5)$ ve $\psi_{3j} (j = 1, 2, \dots, 5)$ katsayılarının açık ifadeleri sırasıyla Ek A ve Ek B'de verilmektedir. Tabakalı kompozit plağın aşağıdaki yük durumunda maruz kaldığı varsayalım:

$$F_x = -F_0, F_y = -\zeta F_0, F_{xy} = 0$$
(11)

Burada ζ terimi yük parametresi olup $\zeta = 0$ olması tek eksenli basınç durumuna ve $\zeta > 0$ olması iki eksenli basınç durumuna karşılık gelmektedir. Denklem (11), Denklem (10)'da yerine yazıldığında poroz ortotropik tabakalı kompozit plağın kayma deformasyon teorisi çerçevesindeki burkulma yükü aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$F_0^{KDT} = \frac{r_{31}\psi_{31} + r_{32}\psi_{32} + r_{34}\psi_{34} + r_{35}\psi_{35} - r_{33}\psi_{33}}{\psi_{33}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 \zeta)}$$
(12)

Denklem (12)'deki enine kayma gerilmeleri veya enine kayma deformasyonları ihmal edilerek klasik plak teorisi kapsamında sonuçlar elde edilmektedir. Hem kayma deformasyon plak teorisi hem de klasik plak teorisi için ifadeler yardımıyla elde edilen sonuçlar dalga sayılarına göre minimize edilerek kritik burkulma yükü bulunmaktadır. Çalışmada boyutsuz kritik burkulma yükleri aşağıdaki ifade yardımıyla elde edilmektedir:

$$\bar{F}_0^{KDT} = \frac{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})b^2}{\pi^2 \beta_{01} h^3} F_0^{KDT}$$
(13)

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu başlık altında, poroz ortotropik tabakalı kompozit plakların kritik burkulma yükü değerleri klasik plak teorisi ve yüksek mertebe kayma deformasyon teorisi kapsamında incelenmektedir. Kayma deformasyonun, porozitenin, ortotropinin ve geometrik oranların kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri araştırılmaktadır.

3.1. Doğrulama Çalışması (Validation Study)

İlk karşılaştırmada, farklı malzeme özelliklerine sahip tabakalı kompozit plağın kayma deformasyon teorisi kapsamındaki kritik burkulma yükü değerleri, [28] ve [30] çalışmalarında elde edilen boyutsuz kritik burkulma yük değerleri ile kıyaslanmaktadır. Karşılaştırmada şu plak karakteristikleri ve malzeme özellikleri kullanılmıştır: $a/h = 10$, $a/b = 1$, $\beta_{012} = \beta_{013} = 0.6\beta_{02}$, $\beta_{023} = 0.5\beta_{02}$, $\nu_{12} = 0.25$. Çizelge 1'de değişik malzeme özellikleri için sunulan değerlerin uyum içinde olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 1. Tek eksenli basınca maruz $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ porozitesiz (M_4) ortotropik tabakalı kompozit plağın boyutsuz kritik burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması

Table 1. Comparison of dimensionless critical buckling load values of non-porous (M_4) orthotropic $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ layered composite plate subjected to uniaxial compression

$\hat{F}_0^{SDT} = F_0^{SDT} (b^2/\beta_{02}h^3)$			
β_{01}/β_{02}	[28]	[30]	Bu çalışma
10	9.7740	9.7621	9.944(1,1)
30	19.957	19.3040	19.698(1,1)

İkinci karşılaştırmada, farklı tabaka dizilişine ve geometrik karakteristiklere sahip ortotropik tabakalı kompozit plağın boyutsuz kritik burkulma değerleri [29] çalışmasındaki değerlerle kıyaslanmaktadır. Karşılaştırmada şu plak karakteristikleri ve malzeme özellikleri kullanılmıştır: $a/b = 1$, $a/h = 20$, $\beta_{01} = 40\beta_{02}$, $\beta_{023} = 0.5\beta_{02}$, $\beta_{012} = \beta_{013} = 0.6\beta_{02}$, $\nu_{12} = 0.25$. Çizelge 2'de değişik malzeme özellikleri için sunulan değerlerin uyum içinde olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 2. Tek eksenli basınca maruz ve farklı tabaka dizilişine sahip porozitesiz (M_4) ortotropik tabakalı kompozit plağın boyutsuz kritik burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması

Table 2. Comparison of dimensionless critical buckling load values of non-porous (M_4) orthotropic laminated composite plate subjected to uniaxial compression and having different layer sequences

$\hat{F}_0^{SDT} = F_0^{SDT} (b^2/\beta_{02}h^3)$		
Tabaka dizilişi	[29]	Bu çalışma
$0^\circ/90^\circ/0^\circ$	30.922	31.073(1,1)
$0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$	31.737	31.678(1,1)

3.2. Özgün Analizler (Original Analysis)

Porozitesiz ve poroz ortotropik tabakalı kompozit plakların kritik basınç yükü değerleri klasik plak teorisi ve kayma deformasyon teorisi kapsamında sayısal olarak elde edilmektedir. Tabakalı kompozit plakların meydana geldiği ortotropik malzeme özellikleri, $\beta_{01} = 206.844GPa$, $\beta_{02} = 18.616GPa$, $\beta_{023} = 2.551GPa$, $\beta_{012} = \beta_{013} = 4.482GPa$, $\nu_{12} = 0.21$ olarak dikkate alınmaktadır. Poroz ortotropik tabakalı kompozit plakların kritik burkulma yükü değerlerinin $a/b = 2$, $\zeta = 0; 1$ ve $\alpha = 0.8$ için a/h 'a bağlı değişimi Çizelge 3'te verilmektedir. (0°) ve ($90^\circ/0^\circ/90^\circ$) gibi iki farklı tabaka dizilimi ile M_1 ve M_4 modelleri dikkate alınmaktadır.

a/h 'in artışına bağlı olarak klasik plak teorisi için elde edilen kritik burkulma yükü değerleri sabit kalırken kayma deformasyon teorisi kapsamında ortaya çıkan kritik burkulma yükü değerleri ise artmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda elde edilen kritik burkulma yükü değerleri, iki eksenli yükleme durumunda ortaya çıkan değerlerden daha büyük olmaktadır. Her iki yükleme durumu arasındaki kritik burkulma yükü değeri farkı a/h 'in artışına bağlı olarak klasik plak teorisinde sabit kalırken kayma deformasyon teorisinde ise artmaktadır. Her iki durumda da M_1 modelinin kritik burkulma yükü değerleri M_4 modelinin değerlerinden daha küçüktür. Tabaka dizilişleri kendi aralarında mukayese edildiğinde, iki eksenli yükleme durumunda üç tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerleri tek tabakalı plaklarınkinden daha büyük olmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda ise klasik plak teorisi kapsamında tek tabakalı plakların, kayma deformasyon teorisi çerçevesinde ise üç tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerleri daha küçük olmaktadır. Tabaka dizilişleri arasındaki bu kritik yük değeri farkı a/h 'in artışına bağlı olarak klasik plak teorisi için sabit kalmaktadır. Kayma deformasyon teorisi için ise iki eksenli yükleme durumunda artarken tek eksenli yükleme durumunda M_1 modeli için önce artıp sonra azalırken M_4 modeli için önce azalır sonra artmaktadır.

Çizelge 3. Tek ve iki eksenli eksenel basınca maruz poroz ortotropik tabakalı kompozit plağın boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin a/h oranına bağlı değişimi

Table 3. Variation of dimensionless critical buckling load values of porous orthotropic laminated composite plate subjected to uniaxial and biaxial compression depending on the a/h ratio

$10\bar{F}_0$								
$\zeta = 0$				$\zeta = 1$				
(0°)								
Klasik Plak Teorisi			Kayma Deformasyon Teorisi		Klasik Plak Teorisi		Kayma Deformasyon Teorisi	
a/h	M_1	M_4	M_1	M_4	M_1	M_4	M_1	M_4
10			2.071 (2,1)	4.665 (2,1)			0.556(1,1)	1.030(1,1)
20			4.260 (1,1)	6.624 (1,1)			0.852(1,1)	1.325(1,1)
30	5.216 (1,1)	7.341 (1,1)	4.740 (1,1)	7.003 (1,1)	1.043(1,1)	1.468(1,1)	0.948(1,1)	1.401(1,1)
40			4.937 (1,1)	7.147 (1,1)			0.987(1,1)	1.429(1,1)
50			5.034 (1,1)	7.215 (1,1)			1.007(1,1)	1.443(1,1)
(90°/0°/90°)								
a/h	M_1	M_4	M_1	M_4	M_1	M_4	M_1	M_4
10			1.324(4,1)	3.149(4,1)			0.952 (2,1)	2.102 (2,1)
20			2.961(4,1)	5.734(3,1)			2.090 (3,1)	3.969 (3,1)
30	5.551(4,1)	8.319(3,1)	3.955(4,1)	6.887(3,1)	3.905 (3,1)	5.759 (3,1)	2.773 (3,1)	4.768 (3,1)
40			4.508(4,1)	7.436(3,1)			3.160(3,1)	5.148(3,1)
50			4.829(4,1)	7.727(3,1)			3.387 (3,1)	5.349 (3,1)

Kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi tüm tabaka dizilişlerinde ve yükleme durumlarında a/h 'in artışına bağlı olarak klasik plak teorisi için sabit kalırken kayma deformasyon teorisi için ise azalmaktadır. Örneğin tek eksenli yükleme ve (90°/0°/90°) için a/h 'in 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak porozitenin etkisi klasik plak teorisi için (-%33.3) ile sabit kalmaktadır. Benzer şekilde, porozitenin etkisi kayma deformasyon teorisi için (-%58)'den (-%37.5)'e azalmaktadır. İki eksenli yükleme durumunda ortaya çıkan porozite etkisi tek eksenli durumda ortaya çıkan etkiden daha küçük olmaktadır. Her iki durum arasındaki bu porozite etkisi farkı tek tabakalı plaklarda daha büyük olmaktadır ve a/h 'in artışına bağlı olarak klasik plak teorisi için sabit kalırken kayma deformasyon teorisi için ise azalmaktadır. Örneğin tek tabakalı plaklarda her iki yükleme durumu arasındaki porozite etkisi farkı a/h 'in 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak kayma deformasyon teorisi için (%9.6) azalmaktadır. Her iki tabaka dizilişi arasındaki en büyük porozite etki farkı (%6.4) olarak $a/h = 10$ 'da elde edilmektedir.

Kritik burkulma yükü üzerindeki kayma deformasyon etkisi tüm tabaka dizilişlerinde ve yükleme durumlarında a/h 'in artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin iki eksenli yükleme durumunda tek tabakalı plaklar için a/h 'in 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak kayma deformasyon etkisi M_1 modelinde (%46.7)'den (%3.5)'e ve M_4 modelinde (%29.8)'den (%1.7)'ye azalmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda ortaya çıkan kayma deformasyon etkisi iki eksenli yükleme durumunda elde edilen etkiden daha büyük olmaktadır ve a/h 'in artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin, M_4 modelinde tek ve iki eksenli yükleme durumları arasındaki kayma deformasyon etkisi farkı a/h 'in 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak tek ve üç tabakalı plaklar için sırasıyla (%6.6) ve (%1.4) azalmaktadır. Tabaka dizilişleri kendi aralarında mukayese edildiğinde, üç tabakalı plaklar için elde edilen kayma deformasyon etkisi tek tabakalı plaklar için ortaya çıkan etkiden daha büyük olmaktadır ve tabaka dizilişleri arasındaki bu kayma deformasyon etkisi farkı a/h 'in artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin iki eksenli yükleme durumunda tek ve üç tabakalı plaklar arasındaki en büyük kayma deformasyon etkisi farkı M_1 ve M_4 modelleri için sırasıyla (%28.9) ve (%33.7) olmaktadır.

Poroz ortotropik tabakalı kompozit plakların kritik burkulma yükü değerlerinin $a/h = 10$, $\zeta = 0; 1$ ve $\alpha = 0.8$ için a/b 'ye bağlı değişimi Tablo 4'te sunulmaktadır. (0°) ve ($0^\circ/90^\circ/0^\circ$) gibi iki farklı tabaka dizilimi ile M_2 ve M_4 modelleri dikkate alınmaktadır.

Çizelge 4. Tek ve iki eksenli eksenel basınca maruz poroz ortotropik tabakalı kompozit plağın boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin a/b oranına bağlı değişimi

Table 4. Variation of dimensionless critical buckling load values of porous orthotropic laminated composite plate subjected to uniaxial and biaxial compression depending on the a/b ratio

		$10\bar{F}_0$							
		$\zeta = 0$				$\zeta = 1$			
		(0°)							
		Klasik Plak Teorisi		Kayma Deformasyon Teorisi		Klasik Plak Teorisi		Kayma Deformasyon Teorisi	
a/b		M_2	M_4	M_2	M_4	M_2	M_4	M_2	M_4
1.0		5.061 (1,1)	12.141 (1,1)	3.668 (1,1)	8.509 (1,1)	2.448(1,2)	5.873(1,2)	1.776(1,2)	4.119(1,2)
1.5		3.214 (1,1)	7.711 (1,1)	2.373 (1,1)	5.515 (1,1)	0.989(1,1)	2.373(1,1)	0.730(1,1)	1.697(1,1)
2.0		3.060 (1,1)	7.341 (1,1)	2.085 (2,1)	4.665 (2,1)	0.612(1,1)	1.468(1,1)	0.444(1,1)	1.030(1,1)
2.5		3.529 (1,1)	8.466 (1,1)	1.601 (2,1)	3.590 (2,1)	0.487(1,1)	1.168(1,1)	0.331(1,1)	0.764(1,1)
3.0		3.214 (2,1)	7.711 (2,1)	1.270 (3,1)	2.785 (3,1)	0.436(1,1)	1.045(1,1)	0.270(1,1)	0.617(1,1)
		$(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$							
a/b		M_2	M_4	M_2	M_4	M_2	M_4	M_2	M_4
1.0		4.779 (1,1)	12.141 (1,1)	3.368 (1,1)	7.967 (1,1)	2.389(1,1)	6.071(1,1)	1.684(1,1)	3.984(1,1)
1.5		3.455 (1,1)	8.319 (1,1)	2.516 (1,1)	5.734 (1,1)	1.063(1,1)	2.560(1,1)	0.774(1,1)	1.764(1,1)
2.0		3.752 (1,1)	8.605 (1,1)	1.895 (2,1)	4.205 (2,1)	0.750(1,1)	1.721(1,1)	0.531(1,1)	1.176(1,1)
2.5		3.777 (2,1)	9.358 (2,1)	1.436 (3,1)	3.109 (3,1)	0.652(1,1)	1.451(1,1)	0.424(1,1)	0.924(1,1)
3.0		3.455 (2,1)	8.319 (2,1)	1.115 (4,1)	2.378 (4,1)	0.614(1,1)	1.345(1,1)	0.356(1,1)	0.770(1,1)

a/b 'nin artışına bağlı olarak kayma deformasyon teorisi kapsamındaki kritik burkulma yükü değerleri azalırken, klasik plak teorisi çerçevesindeki kritik yük değerleri ise önce azalıp sonra artıp tekrar azalmaktadır. Tek eksenli yükleme için elde edilen kritik burkulma yükü değerleri iki eksenli yükleme için ortaya çıkan kritik yükten daha büyük olmaktadır. Her iki yükleme durumu arasındaki kritik burkulma yükü değeri farkı a/b 'nin artışına bağlı olarak kayma deformasyon teorisinde azalmaktadır. Klasik plak teorisinde ise önce azalıp sonra artıp tekrar azalmaktadır. Her iki yükleme durumunda da M_2 modelinin kritik burkulma yükü değerleri M_4 modelinin değerlerinden daha küçüktür. Tabaka dizilişleri kendi aralarında kıyaslandığında, iki eksenli yükleme için $a/b > 1$ aralığında üç tabakalı plağın kritik burkulma yükü değeri tek tabakalı plakta ortaya çıkan değerlerden daha büyük olmaktadır. Benzer şekilde tek eksenli yükleme durumunda, tek tabakalı plağın kayma deformasyon teorisi kapsamındaki

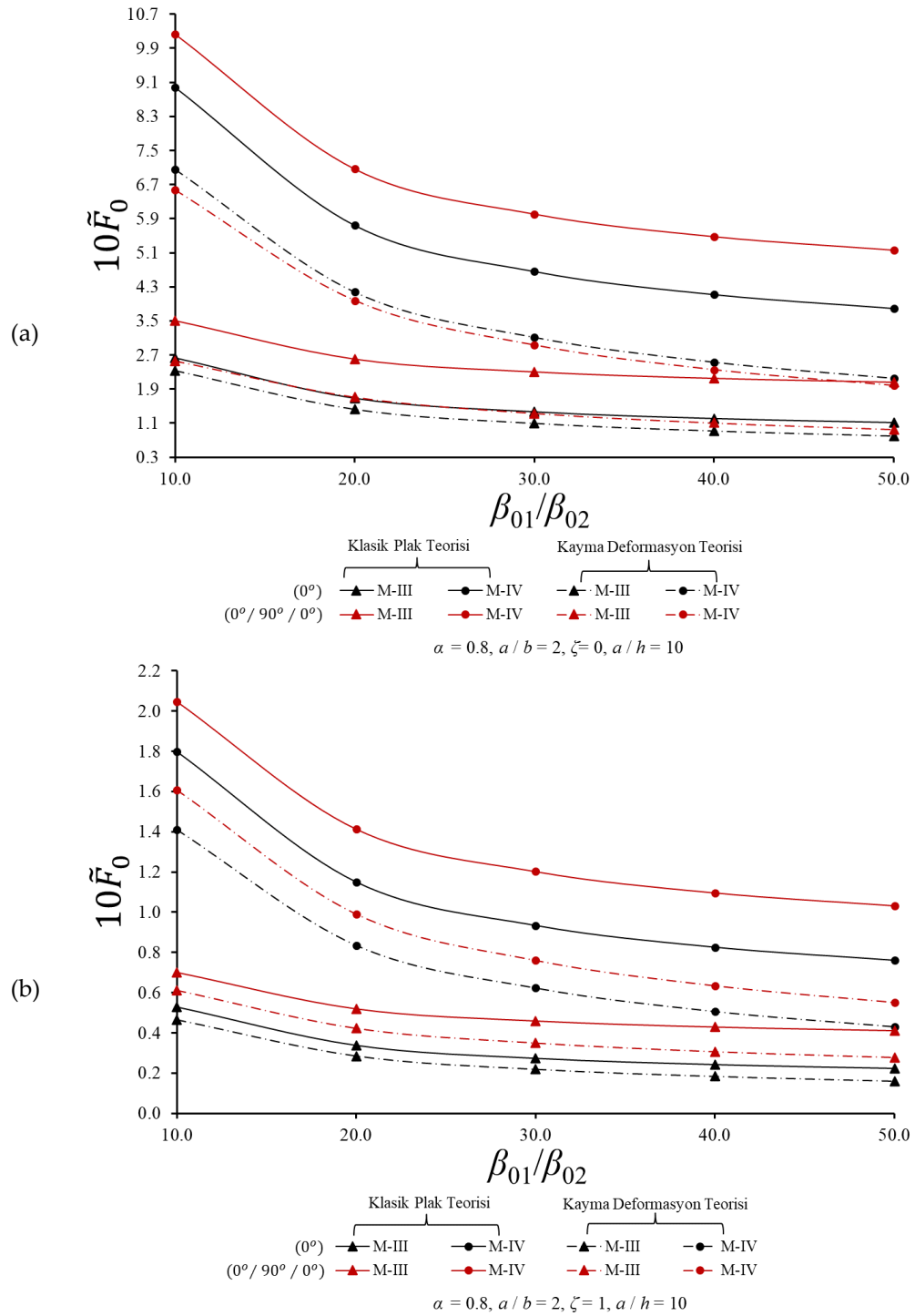
kritik burkulma yükü değeri üç tabakalı plağın değerlerinden daha büyük olmaktadır. Klasik plak teorisi için $a/b > 1$ aralığında tek tabakalı plağın klasik plak teorisi çerçevesindeki kritik burkulma yükü değeri üç tabakalı plağın değerlerinden daha küçük olmaktadır.

Üç tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi a/b 'nin artışına bağlı olarak azalmaktadır. Tek tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi ise a/b 'nin artışına bağlı olarak iki eksenli yükleme durumunda sabit kalmaktadır ve tek eksenli yükleme durumunda ise klasik plak teorisi için sabit kalırken kayma deformasyon teorisi için ise azalmaktadır. Örneğin iki eksenli yükleme durumunda üç tabakalı plağın kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi a/b 'nin 1'den 3'e artışına bağlı olarak kayma deformasyon teorisinde (-%57.7)'den (-%53.8)'e azalırken klasik plak teorisinde ise (-%60.7)'den (-%54.4)'e azalmaktadır. İki eksenli yükleme durumunda kayma deformasyon teorisi için ortaya çıkan porozite etkileri tek eksenli yükleme durumundakilerden daha büyük olmaktadır. Klasik plak teorisi için tek tabakalı plaklarda her iki yükleme durumunda elde edilen porozite etkileri hemen hemen aynı olmaktadır. Üç tabakalı plaklarda ise $a/b \geq 2.5$ aralığında tek eksenli yükleme durumunda elde edilen porozite etkileri iki eksenli yükleme için ortaya çıkan etkilerden daha büyük olmaktadır. Her iki yükleme durumu arasındaki porozite etkisi farkı a/b 'nin artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, üç tabakalı plakları için her iki yükleme durumu arasındaki porozite etkisi farkı a/b 'nin 1'den 3'e artışına bağlı olarak kayma deformasyon ve klasik plak teorilerinde sırasıyla (%0.7) ve (%4.1) azalmaktadır. Tabaka dizilişleri kendi aralarında mukayese edildiğinde, iki eksenli yükleme durumunda $a/b > 1$ aralığında tek tabakalı plaklarda meydana gelen porozite etkisi üç tabakalı plaklardakinden daha büyük olmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda ise kayma deformasyon teorisi kapsamında $a/b > 1$ aralığında üç tabakalı plaklarda elde edilen porozite etkisi, klasik plak teorisi çerçevesinde ise $1 \leq a/b \leq 3$ aralığında tek tabakalı plaklarda ortaya çıkan porozite etkisi daha küçük olmaktadır. Her iki tabaka dizilişi arasındaki porozite etkisi farkı a/b 'nin 1'den 3'e artışına bağlı olarak iki eksenli yükleme durumunda yaklaşık (%1.6) artmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda ise kayma deformasyon teorisi için (%0.4) artarken klasik plak teorisi için (%2.1) azalmaktadır.

Kritik burkulma yükü üzerindeki kayma deformasyon etkisi a/b 'nin artışına bağlı olarak önce azalıp sonra artmaktadır. İki eksenli yükleme durumunda tek tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki kayma deformasyon etkisi a/b 'nin 1'den 3'e artışına bağlı olarak önce yaklaşık (%1.4) azalırken sonra yaklaşık (%12.5) artmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda ortaya çıkan kayma deformasyon etkisi iki eksenli yükleme durumundaki etkiden daha büyük olmaktadır ve her iki yükleme durumu arasındaki kayma deformasyon etkisi farkı a/b 'nin artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, üç tabakalı plaklarda her iki yükleme durumu arasındaki kayma deformasyon etkisi farkı a/b 'nin 1'den 3'e artışına bağlı olarak M_2 ve M_4 modellerinde sırasıyla (%25.6) ve (%28.7) artmaktadır. Üç tabakalı plaklarda elde edilen kayma deformasyon etkisi tek tabakalı plaklarda ortaya çıkan etkiden daha büyük olmaktadır. Her iki tabaka dizilişi arasındaki en büyük kayma deformasyon etkisi farkı tek eksenli yükleme için (%17.6) ile $a/b = 2$ 'de elde edilirken iki eksenli yükleme durumunda ise (%4.5) ile $a/b = 1$ 'de ortaya çıkmaktadır.

Poroz ortotropik tabakalı kompozit plakların kritik burkulma yükü değerlerinin $a/b = 2$; $a/h = 10$, $\alpha = 0.8$ ve $\zeta = 0; 1$ için β_{01}/β_{02} 'ye bağlı değişimi Şekil 2'de sunulmaktadır. (0°) ve ($0^\circ/90^\circ/0^\circ$) gibi iki farklı tabaka dizilimi ile M_3 ve M_4 modelleri dikkate alınmaktadır.

Düzlem içi ortotropi oranı β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak kritik burkulma yükü değerleri azalmaktadır. M_3 modelinden oluşan tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerleri M_4 modelinden meydana gelen tabakalı plaklarınkinden daha küçük olmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda elde edilen kritik burkulma yükü değerleri iki eksenli yükleme için ortaya çıkan kritik yük değerlerinden daha büyük olmaktadır. Her iki yükleme arasındaki bu kritik burkulma yükü değeri farkı β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 2. (a) Tek eksenli ve (b) iki eksenli aksel basınca maruz poroz ortotropik tabakalı kompozit plağın boyutsuz kritik burkulma yükü değerlerinin β_{01}/β_{02} oranına bağlı değişimi

Figure 2. Variation of dimensionless critical buckling load values of porous orthotropic laminated composite plate subjected to (a) uniaxial and (b) biaxial axial pressure, depending on the β_{01}/β_{02} ratio

Tabaka dizilişleri kendi aralarında mukayese edildiğinde, iki eksenli yükleme durumunda tek tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerleri üç tabakalı plakların değerlerinden daha küçük olmaktadır. Tek eksenli yükleme durumunda ise dört tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerleri tek tabakalı plakların değerlerinden klasik plak teorisi kapsamında daha büyük olurken kayma deformasyon teorisi çerçevesinde ise M_4 modelinde daha küçük, M_3 modelinde daha büyük olmaktadır.

Üç ve tek tabakalı plaklar arasındaki bu kritik yük değeri farkı β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak klasik plak teorisi için artarken kayma deformasyon teorisi için azalmaktadır.

Kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak sadece tek tabakalı plak için klasik plak teorisi kapsamında sabit kalmaktadır. Bunun dışındaki tüm durumlarda β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi azalmaktadır. Örneğin iki eksenli yüklemeye maruz üç tabakalı plak için β_{01}/β_{02} 'nin 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi kayma deformasyon teorisi için (-%62)'den (-%49.7)'e ve klasik plak teorisi için (-%65.8)'den (-%60.1)'e azalmaktadır. Her iki yükleme durumu porozite etkisi açısından kıyaslandığında, iki eksenli yüklemeye maruz üç tabakalı plakların kayma deformasyon teorisi kapsamındaki porozite etkileri tek eksenli yükleme durumundaki etkilerden daha büyük olurken bunun dışındaki tüm durumlarda her iki yükleme durumundaki porozite etkisi eşit olmaktadır. Üç tabakalı plakların kayma deformasyon teorisi kapsamındaki yükleme durumları arasındaki porozite etkisi farkı β_{01}/β_{02} 'nin 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak yaklaşık (%2) artmaktadır. Kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi üç tabakalı durumda daha küçük olmaktadır. Tek ve üç tabakalı plaklar arasındaki bu porozite etkisi farkı β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, her iki tabaka dizilişi arasındaki porozite etkisi farkı β_{01}/β_{02} 'nin 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak tek ve iki eksenli yükleme durumlarında sırasıyla (%6) ve (%8) civarı artmaktadır.

Kritik burkulma yükü üzerindeki kayma deformasyon etkisi β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin üç tabakalı plaklar için β_{01}/β_{02} 'nin 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak kritik burkulma yükü üzerindeki kayma deformasyon etkisi tek eksenli yükleme durumunda her iki model için de (%26) civarı artarken iki eksenli yükleme durumunda ise M_3 ve M_4 modellerinde sırasıyla (%20) ve (%25) artmaktadır. Üç tabakalı plaklar için ortaya çıkan kayma deformasyon etkisi tek tabakalı plaklar için elde edilen değerlerden daha büyük olmaktadır. İki tabaka dizilişi arasındaki kayma deformasyon etkisi farkı β_{01}/β_{02} 'nin artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, M_3 modelinden meydana gelen tek ve üç tabakalı plaklar arasındaki kayma deformasyon etkisi farkı β_{01}/β_{02} 'nin 10'dan 50'ye artışına bağlı olarak tek eksenli yükleme durumunda (%15.3)'ten (%25.6)'ya ve iki eksenli yükleme durumunda (%1.1)'den (%4.5)'e artış göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, poroz ortotropik tabakalı plakların burkulma davranışı yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi kapsamında incelenmektedir. Plakların tek ve iki eksenli eksenel basınç yüküne maruz kaldığı varsayılmaktadır. Poroz ortotropik tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki geometrik parametrelerin, porozitenin, kayma deformasyonun, yükleme koşullarının ve düzlem içi ortotropinin etkileri detaylı olarak incelenmektedir. Bu analizler sonucunda ortaya çıkan genel sonuçlar aşağıda sunulduğu gibidir:

1. Kayma deformasyon teorisi kapsamındaki kritik burkulma yükü değerleri a/h oranının artışına bağlı olarak artarken klasik plak teorisi kapsamında elde edilen kritik yük değerleri ise sabit kalmaktadır.
2. Kayma deformasyon teorisi kapsamındaki kritik burkulma yükü değerleri a/b oranının artışına bağlı olarak azalırken klasik plak teorisi kapsamında elde edilen kritik yük değerleri ise önce azalıp sonra artıp tekrar azalmaktadır.
3. Kullanılan her iki teori kapsamında elde edilen kritik burkulma yükü değerleri β_{01}/β_{02} oranlarının artışına bağlı olarak azalmaktadır.
4. Tek eksenli yüklemeye maruz poroz tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerleri, iki eksenli yüklemeye maruz poroz tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerlerinden daha büyük olmaktadır.
5. Kayma deformasyon teorisi kapsamında her iki yükleme durumu arasındaki kritik burkulma yükü değeri farkı a/h oranının artışına bağlı olarak artarken, a/b ve β_{01}/β_{02} oranlarının artışına bağlı olarak azalmaktadır.
6. Porozitenin varlığı tabakalı plakların kritik burkulma yükü değerlerini azaltmaktadır.

7. Poroz tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi, kayma deformasyon teorisi kapsamında a/h oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Klasik plak teorisi için ise a/h oranının artışına bağlı olarak sabit kalmaktadır.
8. Poroz çok tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki porozite etkisi a/b ve β_{01}/β_{02} oranlarının artışına bağlı olarak azalmaktadır.
9. Tek ve iki eksenli yükleme koşulları arasındaki porozite etkisi farkı kayma deformasyon teorisi kapsamında a/h oranının artışına bağlı olarak azalırken a/b oranının artışına bağlı olarak ise artmaktadır.
10. Tabaka dizilişleri arasındaki porozite etkisi farkı β_{01}/β_{02} ve a/b oranlarının artışına bağlı olarak artmaktadır.
11. Poroz tabakalı plakların kritik burkulma yükü üzerindeki kayma deformasyon etkisi, a/h oranının artışına bağlı olarak azalırken β_{01}/β_{02} oranlarının artışına bağlı olarak artmaktadır. a/b oranının artışına bağlı olarak ise önce azalır sonra artmaktadır.
12. Tek ve iki eksenli yükleme koşulları arasındaki kayma deformasyon etkisi farkı a/h oranının artışına bağlı olarak azalırken a/b oranının artışına bağlı olarak ise artmaktadır.
13. Çok tabakalı poroz plaklar ve tek tabakalı poroz plaklar arasındaki kayma deformasyon etkisi farkı a/h oranının artışına bağlı olarak azalırken β_{01}/β_{02} oranlarının artışına bağlı olarak ise artmaktadır.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları, yazarlık, alıntı, veri raporlama ve orijinal araştırma yayınlama da dahil olmak üzere etik yönergelere uyduklarını beyan ederler.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Ferruh TURAN: Orijinal taslak – makalenin yazımı – sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, denetleme. Suna ULU: Araştırma, analizler, kaynaklar. Yıldız ÜNAL: Analizler, modelleme.

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] F. Turan, M. F. Başoğlu, and Z. Zerin, "Analytical solution for bending and buckling response of laminated non-homogeneous plates using a simplified-higher order theory," *Challenge Journal of Structural Mechanics*, vol. 3, no. 1, pp. 1-16, 2017.
- [2] K. Magnucki, M. Malinowski, and J. Kasprzak, "Bending and buckling of a rectangular porous plate," *Steel and Composite Structures*, vol. 6, no. 4, pp. 319-333, 2006.
- [3] E. Magnucka-Blandzi, "Axi-symmetrical deflection and buckling of circular porous-cellular plate," *Thin-Walled Structures*, vol. 46, no. 3, pp. 333-337, 2008.

- [4] M. Jabbari, E. F. Joubaneh, A. R. Khorshidvand, and M. R. Eslami, "Buckling analysis of porous circular plate with piezoelectric actuator layers under uniform radial compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 70, pp. 50-56, 2013.
- [5] A. Mojahedin, E. F. Joubaneh, and M. Jabbari, "Thermal and mechanical stability of a circular porous plate with piezoelectric actuators," *Acta Mechanica*, vol. 225, no. 12, pp. 3437-3452, 2014.
- [6] E. Farzaneh Joubaneh, A. Mojahedin, A. R. Khorshidvand, and M. Jabbari, "Thermal buckling analysis of porous circular plate with piezoelectric sensor-actuator layers under uniform thermal load," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 17, no. 1, pp. 3-25, 2015.
- [7] M. Jabbari, M. Hashemitaheri, A. Mojahedin, and M. R. Eslami, "Thermal buckling analysis of functionally graded thin circular plate made of saturated porous materials," *Journal of Thermal Stresses*, vol. 37, no. 2, pp. 202-220, 2014.
- [8] A. Gupta and M. Talha, "Stability characteristics of porous functionally graded plate in thermal environment," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 330, no. 1, p. 012011, 2018.
- [9] M. Malikan, F. Tornabene, and R. Dimitri, "Nonlocal three-dimensional theory of elasticity for buckling behavior of functionally graded porous nanoplates using volume integrals," *Mater. Res. Express*, vol. 5, no. 9, 2018.
- [10] M. Panah, A. R. Khorshidvand, S. M. Khorsandijou, and M. Jabbari, "Pore pressure and porosity effects on bending and thermal postbuckling behavior of FG saturated porous circular plates," *Journal of Thermal Stresses*, vol. 42, no. 9, pp. 1083-1109, 2019.
- [11] F. Kiarasi, M. Babaei, K. Asemi, R. Dimitri, and F. Tornabene, "Three-dimensional buckling analysis of functionally graded saturated porous rectangular plates under combined loading conditions," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, pp. 1-21, 2021.
- [12] J. N. Reddy, "A simple higher-order theory for laminated composite plates," *J Appl Mech Trans ASME*, vol. 51, no. 4, pp. 745-752, 1984.
- [13] M. Touratier, "An efficient standard plate theory," *International Journal of Engineering Science*, vol. 29, no. 8, pp. 901-916, 1991.
- [14] K. P. Soldatos, "A transverse shear deformation theory for homogeneous monoclinic plates," *Acta Mechanica*, vol. 94, no. 3-4, pp. 195-220, 1992.
- [15] M. Karama, K. S. Afaq, and S. Mistou, "Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 40, no. 6, pp. 1525-1546, 2003.
- [16] M. Aydogdu, "A new shear deformation theory for laminated composite plates," *Composite Structures*, vol. 89, no. 1, pp. 94-101, 2009.
- [17] H. T. Thai and D. H. Choi, "A simple first-order shear deformation theory for the bending and free vibration analysis of functionally graded plates," *Composite Structures*, vol. 101, pp. 332-340, 2013.
- [18] H. T. Thai and D. H. Choi, "A simple first-order shear deformation theory for laminated composite plates," *Composite Structures*, vol. 106, pp. 754-763, 2013.
- [19] A. Mahi, E. A. Adda Bedia, and A. Tounsi, "A new hyperbolic shear deformation theory for bending and free vibration analysis of isotropic, functionally graded, sandwich and laminated composite plates," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, no. 9, pp. 2489-2508, 2015.
- [20] A. Mojahedin, M. Jabbari, A. R. Khorshidvand, and M. R. Eslami, "Buckling analysis of functionally graded circular plates made of saturated porous materials based on higher order shear deformation theory," *Thin-Walled Structures*, vol. 99, pp. 83-90, 2016.
- [21] A. Gupta and M. Talha, "Influence of initial geometric imperfections and porosity on the stability of functionally graded material plates," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 46, no. 6, pp. 693-711, 2018.
- [22] S. Coskun, J. Kim, and H. Toutanji, "Bending, free vibration, and buckling analysis of functionally graded porous micro-plates using a general third-order plate theory," *J. Compos. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1-22, 2019.

- [23] T. H. L. Bekkaye et al., "Porosity-dependent mechanical behaviors of FG plate using refined trigonometric shear deformation theory," *Comput. Concr.*, vol. 26, no. 5, pp. 439-450, 2020.
- [24] A. R. Khorshidvand and A. R. Damercheloo, "Bending, axial buckling and shear buckling analyses of FG-porous plates based on a refined plate theory," *Aust. J. Mech. Eng.*, pp. 1-20, 2021.
- [25] M. Dhuria, N. Grover, and K. Goyal, "Influence of porosity distribution on static and buckling responses of porous functionally graded plates," *Structures*, vol. 34, pp. 1458-1474, 2021.
- [26] A. M. Zenkour and M. H. Aljadani, "Buckling Response of Functionally Graded Porous Plates Due to a Quasi-3D Refined Theory," *Mathematics*, vol. 10, no. 4, pp. 1-20, 2022.
- [27] R. Kumar, A. Lal, B. N. Singh, and J. Singh, "Numerical simulation of the thermomechanical buckling analysis of bidirectional porous functionally graded plate using collocation meshfree method," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mat. Des. Appl.*, vol. 236, no. 4, pp. 787-807, 2022.
- [28] N. D. Phan and J. N. Reddy, "Analysis of laminated composite plates using a higher-order shear deformation theory," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 21, no. 12, pp. 2201-2219, 1985.
- [29] J. N. Reddy and N. D. Phan, "Stability and vibration of isotropic, orthotropic and laminated plates according to a higher-order shear deformation theory," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 98, no. 2, pp. 157-170, 1985.
- [30] A. K. Noor, "Stability of multilayered composite plates," *Fibre Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 81-89, 1975.
- [31] Y. Yuan, K. Zhao, and K. Xu, "Enhancing the static behavior of laminated composite plates using a porous layer," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 72, no. 6, pp. 763-774, 2019.
- [32] Y. Z. Yüksel and Ş. D. Akbaş, "Hygrothermal stress analysis of laminated composite porous plates," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 80, no. 1, pp. 1-13, 2021.
- [33] F. Pathan, S. Singh, S. Natarajan, and G. Watts, "An analytical solution for the static bending of smart laminated composite and functionally graded plates with and without porosity," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 92, no. 3, pp. 903-931, 2022.

EK A (APPENDIX A)

$$\begin{aligned}
r_{11} &= (\lambda_1^3 \eta_{11}^0 + \lambda_1 \lambda_2^2 \eta_{66}^0), r_{12} = \lambda_1^2 \lambda_2 (\eta_{12}^0 + \eta_{66}^0), r_{13} = -[\lambda_1^4 \eta_{11}^1 + \lambda_1^2 \lambda_2^2 (\eta_{12}^1 + 2\eta_{66}^1)], \\
r_{14} &= (\lambda_1^3 \hat{\eta}_{11}^0 + \lambda_1 \lambda_2^2 \hat{\eta}_{66}^0), r_{15} = \lambda_1^2 \lambda_2 (\hat{\eta}_{12}^0 + \hat{\eta}_{66}^0), r_{21} = \lambda_1 \lambda_2^2 (\eta_{21}^0 + \eta_{66}^0), \\
r_{22} &= (\lambda_1^2 \lambda_2 \eta_{66}^0 + \lambda_2^3 \eta_{22}^0), r_{23} = -[\lambda_1^2 \lambda_2^2 (\eta_{21}^1 + 2\eta_{66}^1) + \lambda_2^4 \eta_{22}^1], r_{24} = \lambda_1 \lambda_2^2 (\hat{\eta}_{21}^0 + \hat{\eta}_{66}^0), \\
r_{25} &= (\lambda_1^2 \lambda_2 \hat{\eta}_{66}^0 + \lambda_2^3 \hat{\eta}_{22}^0), r_{31} = [\lambda_1^3 \eta_{11}^1 + \lambda_1 \lambda_2^2 (\eta_{21}^1 + 2\eta_{66}^1)], \\
r_{32} &= [\lambda_2^3 \eta_{22}^1 + \lambda_1^2 \lambda_2 (\eta_{12}^1 + 2\eta_{66}^1)], r_{33} = -[\lambda_1^4 \eta_{11}^2 + \lambda_1^2 \lambda_2^2 (\eta_{12}^2 + \eta_{21}^2 + 4\eta_{66}^2) + \lambda_2^4 \eta_{22}^2], \\
\tilde{r}_{33} &= (\lambda_1^2 p_x + \lambda_2^2 p_y) - r_{33}, r_{34} = [\lambda_1^3 \hat{\eta}_{11}^1 + \lambda_1 \lambda_2^2 (\hat{\eta}_{21}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1)], \\
r_{35} &= [\lambda_2^3 \hat{\eta}_{22}^1 + \lambda_1^2 \lambda_2 (\hat{\eta}_{12}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1)], r_{41} = (\lambda_1^3 \hat{\eta}_{11}^0 + \lambda_1 \lambda_2^2 \hat{\eta}_{66}^0), r_{42} = \lambda_1^2 \lambda_2 (\hat{\eta}_{12}^0 + \hat{\eta}_{66}^0), \\
r_{43} &= -[\lambda_1^4 \hat{\eta}_{11}^1 + \lambda_1^2 \lambda_2^2 (\hat{\eta}_{12}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1)], r_{44} = (\lambda_1^3 \hat{\eta}_{11}^1 + \lambda_1 \lambda_2^2 \hat{\eta}_{66}^1 + \lambda_1 \eta_{55}^1), r_{45} = \lambda_1^2 \lambda_2 (\hat{\eta}_{12}^1 + \hat{\eta}_{66}^1), \\
r_{51} &= \lambda_1 \lambda_2^2 (\hat{\eta}_{21}^0 + \hat{\eta}_{66}^0), r_{52} = (\lambda_1^2 \lambda_2 \hat{\eta}_{66}^0 + \lambda_2^3 \hat{\eta}_{22}^0), r_{53} = -[\lambda_1^2 \lambda_2^2 (\hat{\eta}_{21}^1 + 2\hat{\eta}_{66}^1) + \lambda_2^4 \hat{\eta}_{22}^1], \\
r_{54} &= \lambda_1 \lambda_2^2 (\hat{\eta}_{21}^1 + \hat{\eta}_{66}^1), r_{55} = (\lambda_1^2 \lambda_2 \hat{\eta}_{66}^1 + \lambda_2^3 \hat{\eta}_{22}^1 + \lambda_2 \eta_{44}^1)
\end{aligned} \tag{A1}$$

EK B (APPENDIX B)

$$\begin{aligned}
\psi_{31} &= r_{12} r_{23} (r_{44} r_{55} - r_{45} r_{54}) + r_{12} r_{43} (r_{25} r_{54} - r_{24} r_{55}) + r_{12} r_{53} (r_{24} r_{45} - r_{25} r_{44}) \\
&+ r_{13} r_{45} (r_{22} r_{54} - r_{24} r_{52}) + r_{13} r_{44} (r_{25} r_{52} - r_{22} r_{55}) + r_{13} r_{42} (r_{24} r_{55} - r_{25} r_{54}) \\
&+ r_{14} r_{23} (r_{45} r_{52} - r_{42} r_{55}) + r_{14} r_{22} (r_{43} r_{55} - r_{45} r_{53}) + r_{14} r_{25} (r_{42} r_{53} - r_{43} r_{52}) \\
&+ r_{15} r_{53} (r_{22} r_{44} - r_{24} r_{42}) + r_{15} r_{43} (r_{24} r_{52} - r_{22} r_{54}) + r_{15} r_{23} (r_{42} r_{54} - r_{44} r_{52})
\end{aligned} \tag{B1}$$



$$\begin{aligned}
\psi_{32} &= -r_{11} r_{23} (r_{44} r_{55} - r_{45} r_{54}) - r_{11} r_{43} (r_{25} r_{54} - r_{24} r_{55}) - r_{11} r_{53} (r_{24} r_{45} - r_{25} r_{44}) \\
&- r_{13} r_{45} (r_{21} r_{54} - r_{24} r_{51}) - r_{13} r_{44} (r_{25} r_{51} - r_{21} r_{55}) - r_{13} r_{41} (r_{24} r_{55} - r_{25} r_{54}) \\
&- r_{14} r_{23} (r_{45} r_{51} - r_{41} r_{55}) - r_{14} r_{21} (r_{43} r_{55} - r_{45} r_{53}) - r_{14} r_{25} (r_{41} r_{53} - r_{43} r_{51}) \\
&- r_{15} r_{21} (r_{44} r_{53} - r_{43} r_{54}) - r_{15} r_{41} (r_{23} r_{54} - r_{24} r_{53}) - r_{15} r_{51} (r_{24} r_{43} - r_{23} r_{44})
\end{aligned} \tag{B2}$$

$$\begin{aligned}
\psi_{33} &= r_{11} r_{22} (r_{44} r_{55} - r_{45} r_{54}) + r_{11} r_{42} (r_{25} r_{54} - r_{24} r_{55}) + r_{11} r_{52} (r_{24} r_{45} - r_{25} r_{44}) \\
&+ r_{12} r_{21} (r_{45} r_{54} - r_{44} r_{55}) + r_{12} r_{24} (r_{41} r_{55} - r_{45} r_{51}) + r_{12} r_{25} (r_{44} r_{51} - r_{41} r_{54}) \\
&+ r_{14} r_{41} (r_{25} r_{52} - r_{22} r_{55}) + r_{14} r_{21} (r_{42} r_{55} - r_{45} r_{52}) + r_{14} r_{51} (r_{22} r_{45} - r_{25} r_{42}) \\
&+ r_{15} r_{41} (r_{22} r_{54} - r_{24} r_{52}) + r_{15} r_{21} (r_{44} r_{52} - r_{42} r_{54}) + r_{15} r_{51} (r_{24} r_{42} - r_{22} r_{44})
\end{aligned} \tag{B3}$$

$$\begin{aligned}
\psi_{34} &= -r_{11} r_{42} (r_{25} r_{53} - r_{23} r_{55}) - r_{11} r_{22} (r_{43} r_{55} - r_{45} r_{53}) - r_{11} r_{52} (r_{23} r_{45} - r_{25} r_{43}) \\
&- r_{12} r_{21} (r_{45} r_{53} - r_{43} r_{55}) - r_{12} r_{51} (r_{25} r_{43} - r_{23} r_{45}) - r_{12} r_{41} (r_{23} r_{55} - r_{25} r_{53}) \\
&- r_{13} r_{41} (r_{25} r_{52} - r_{22} r_{55}) - r_{13} r_{21} (r_{42} r_{55} - r_{45} r_{52}) - r_{13} r_{51} (r_{22} r_{45} - r_{25} r_{42}) \\
&- r_{15} r_{21} (r_{43} r_{52} - r_{42} r_{53}) - r_{15} r_{51} (r_{23} r_{42} - r_{22} r_{43}) - r_{15} r_{41} (r_{22} r_{53} - r_{23} r_{52})
\end{aligned} \tag{B4}$$

$$\begin{aligned}
\psi_{35} &= r_{11} r_{22} (r_{43} r_{54} - r_{44} r_{53}) + r_{11} r_{42} (r_{24} r_{53} - r_{23} r_{54}) + r_{11} r_{52} (r_{23} r_{44} - r_{24} r_{43}) \\
&+ r_{12} r_{41} (r_{23} r_{54} - r_{24} r_{53}) + r_{12} r_{21} (r_{44} r_{53} - r_{43} r_{54}) + r_{12} r_{51} (r_{24} r_{43} - r_{23} r_{44}) \\
&+ r_{13} r_{51} (r_{22} r_{44} - r_{24} r_{42}) + r_{13} r_{21} (r_{42} r_{54} - r_{44} r_{52}) + r_{13} r_{41} (r_{24} r_{52} - r_{22} r_{54}) \\
&+ r_{14} r_{41} (r_{22} r_{53} - r_{23} r_{52}) + r_{14} r_{21} (r_{43} r_{52} - r_{42} r_{53}) + r_{14} r_{51} (r_{23} r_{42} - r_{22} r_{43})
\end{aligned} \tag{B5}$$

DEEP LEARNING BASED HUMAN ROBOT INTERACTION WITH 5G COMMUNICATION

^{1*}Mücahid BARSTUĞAN , ²Zeynep OSMANPAŞAOĞLU 

¹Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Konya, TÜRKİYE

²Marmara University, Technology Faculty, Mechatronics Engineering Department, İstanbul, TÜRKİYE
mbarstugan@ktun.edu.tr, zeynep.osmanpasaoglu@tr.mee.com

Highlights

- The remote control process of industrial collaborative robotic arm over 5G communication is presented.
- The control process is implemented over deep learning methods such as YOLOv4 and YOLOv5.
- The robotic hand is remotely controlled using a glove equipped with flex sensors.

Graphical Abstract

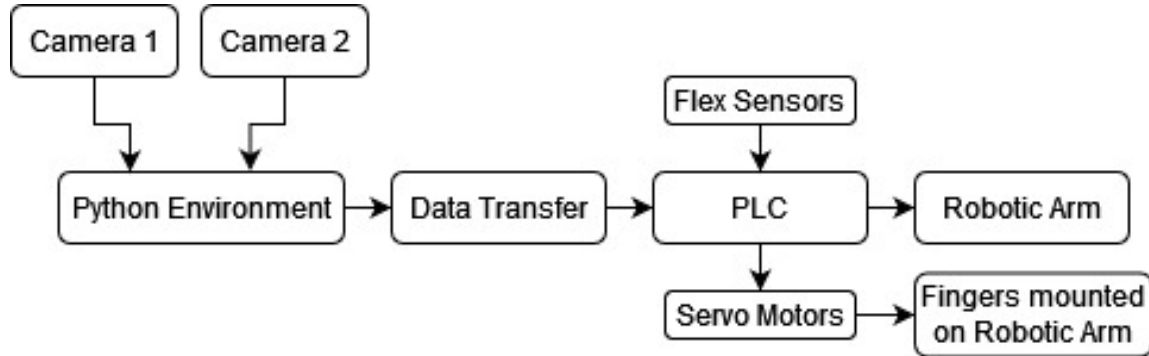




Figure Flowchart of the proposed method



DEEP LEARNING BASED HUMAN ROBOT INTERACTION WITH 5G COMMUNICATION

^{1*}Mücahid BARSTUĞAN , ²Zeynep OSMANPAŞAOĞLU 

¹Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Konya, TÜRKİYE

²Marmara University, Technology Faculty, Mechatronics Engineering Department, İstanbul, TÜRKİYE

¹mbarstugan@ktun.edu.tr, ²zeynep.osmanpasaoglu@tr.mee.com

(Received: 02.01.2023; Accepted in Revised Form: 20.02.2023)

ABSTRACT: Factories focusing on digital transformation accelerate their production and surpass their competitors by increasing their controllability and efficiency. In this study, the data obtained by image processing with the aim of digital transformation was transferred to the collaborative robot arm with 5G communication and the robot arm was remotely controlled. A 3D-printed humanoid hand is mounted on the end of the robot arm for bin picking. Each finger is controlled by five servo motors. For finger control, the user wore a glove, and the finger positions of the user were transferred to the servo motors thanks to each flex sensor attached to the glove. In this way, the desired pick and place process is provided. The position control of the robot arm was realized with image processing. The gloves worn by the user were determined by two different YOLO (You only look once) methods. YOLOv4 and YOLOv5 algorithms were compared by using Python software language in object detection. While the highest detection accuracy obtained with the YOLOv4 algorithm during the test phase was 99.75% in the front camera, it was 99.83% in the YOLOv5 algorithm; YOLOv4 detection accuracy was the highest in the side camera of 97.59%, and YOLOv5 detection accuracy was 97.9%.

Keywords: Collaborative Robot Arm, Digital Transformation, Object Detection, Remote Control, YOLO

1. INTRODUCTION

Digital transformation has entered a new era with artificial intelligence, augmented reality, big data and 3D printer technologies. All data is transferred to digital environment by transforming the production processes of companies from analog (manual) controls to digital (automatic) control. Because digital transformation requires adapting to new conditions, it takes time for a company to complete the digital transformation process. Digital transformation mostly proceeds through automation systems. Automation systems are being developed and transforming into robotic systems. During this period, the need for operators is being eliminated. Robotic systems are evolving to do all the work a human can do. However, there may be a need for the robot control to be controlled by a human. Especially in studies for the disabled, robot control is carried out with brain signals. In a study using camera and EEG sensors, brain signals were controlled by an industrial robot arm [1, 2]. In studies using only cameras, predetermined hand movements were classified by deep learning methods and robot arm control was provided [3-5]. With the advancement of technology, studies involving human-robot interaction are increasing. Thanks to the digital twin of the factories, human-robot interaction can be transferred into the digital environment [6]. Digital twins enable all real-time data in the process to be stored and analyzed in a virtual environment. In this way, the appropriate and safe working environment required for human-robot interaction can be established. Human-robot interaction applications are also used in the fields of agriculture [7] and health [8] apart from production factories. In a study in the field of agriculture, the image taken by the robot is sent to the remote operator. The operator marks the product to be purchased and the robot takes the product [7]. In the study conducted in the field of health, the robot arm supports the doctors in surgeries with eye tracking made from the camera [8]. In the future, these studies will allow patients to have surgery in their own country in hospitals where appropriate

*Corresponding Author: Mücahid BARSTUĞAN, mbarstugan@ktun.edu.tr

devices are available, without going to the country where the doctor is located. With the spread of 5G technology, communication will accelerate, and remote-control systems will become widespread. In this way, robots with 5G communication will be able to enter areas where humans cannot enter, and robots will be able to do things that humans cannot do with remote control systems. Remote control systems can be a controller, an artificial intelligence algorithm or a system with sensors.

The YOLO method (You Only Look Once), which is one of the popular artificial intelligence algorithms, is used in many different areas. Food [9-12], hand gesture detection [13], construction [14], agriculture [15-17], occupational health and safety [18-20], unmanned aerial vehicle [21-25], object detection [26, 27], medical [28], maritime [29], fire detection [30], traffic sign [31] and mask detection [32, 33]. With this study, real-time applications of the YOLO method are carried out. A summary of the literature studies is presented in Table 1.

Table 1. The literature summary

Paper	Year	Field of the Paper	Dataset	Detected object	Method
[9]	2021	Food	GWHD	Wheat Heads	YOLOv5, Faster-RCNN
[11]	2022	Food	Leaf	Leaf Disease	YOLOv5
[13]	2021	Posture Detection	Custom Dataset	Hand	YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5
[14]	2022	Construction	Custom Dataset	Aggregate	YOLOv4, YOLOv5
[16]	2021	Agriculture	Custom Dataset	Insect on Soybean Crop	YOLOv4, YOLOv5
[15]	2022	Agriculture	Plant Village	Leaf Disease	YOLOv4, YOLOv5
[20]	2022	Occupational Safety	Safety Helmet Wearing	Helmet Detection	YOLOv5
[19]	2022	Occupational Safety	SHEL5K	Helmet Detection	YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5
[22]	2022	Unmanned Aerial Vehicle	A2G	Drone Images	YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5
[26]	2022	Object Detection	Custom Dataset	Pantry Objects	YOLOv5
[27]	2021	Object Detection	KAIST, FLIR	Infrared Image Objects	YOLO-FIRI
[28]	2021	Medical	BRATS	Brain Tumors	YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5
[29]	2021	Marine	Maritime	Ship Types	YOLOv4, YOLOv5
[31]	2022	Object Detection	Custom Dataset	Traffic Signs	SSD, YOLOv5
[33]	2022	Mask Detection	ViDMASK	Face Mask	Mask R-CNN, YOLOv4, YOLOv5

The literature studies summarized in Table 1 show that the YOLO algorithm is used in real-time applications and has high success in most applications. In non-real-time artificial intelligence studies, hardware cost and performance, communication speed between products are ignored, and they are trained and tested on ready data sets. In this study, a data set was created from scratch and tested on real-time camera images. The generated algorithm has been optimized by testing the hardware performance and communication speeds of the system. Thanks to the 5G infrastructure, remote control was provided in the installed system. In the Table 1, remote control process was performed in [7] only.

This study established a real-time experimental environment and controlled a collaborative robot

arm remotely with high performance. In the application, the basis of remote robot arm control was laid with 5G communication. In the system, the right arm of the operator was monitored with a camera from two different angles and the right arm movement detected by artificial intelligence was transferred to the robot arm. The flex sensor glove worn on the right hand sensed the finger movements of the operator and controlled the fingers mounted on the robot arm. Artificial intelligence data has been transferred to the robot and digital environment with 5G communication. Thanks to the data transferred to the digital environment, the operator can control the robot from different environments. Thanks to this technology, nuclear, chemical, poisonous gas, etc. areas, which people cannot enter, robots will be sent, and tasks will be completed by remote control. Another advantage of this technology will be the transfer of human abilities to the robot. The delicate workmanship of the craftsmen will be copied to the digital environment and more than one robot worker will be able to do the same delicate work.

The study consists of four parts. In Section 2, the introduction of the materials used in the study and the creation of a data set are explained. In Section 3, the results of the system are presented, and the operation of the system is explained. In Section 4, the findings are evaluated and information about future studies is given.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Material

In this study, a computer with powerful hardware, a human hand model printed with a 3D printer, a collaborative robot arm, PLC, two sim cards attached to two 5G modems, servo motor drivers and two USB cameras (Logitech C270 webcam) were used. High speed metal gear dual ball bearing servo motors were used to control the fingers. The operation voltage of the servo motors is 5V. Each servo has an operation speed as 0.2sn/60o for 4.8V operation voltage. Identical webcams for used in the experiment. The resolution of webcam is 720P at 30 FPS (frame per second).

2.1.1 Human hand model and gloves

The human hand model designed and produced to pick products is mounted on the 6th axis of the robot arm. After the robot arm was moved to a certain position, the bin picking process was carried out by moving the fingers. The flex sensor glove that reads the finger movements and the servo motor block that moves the 3D printed fingers are shown in Figure 1.

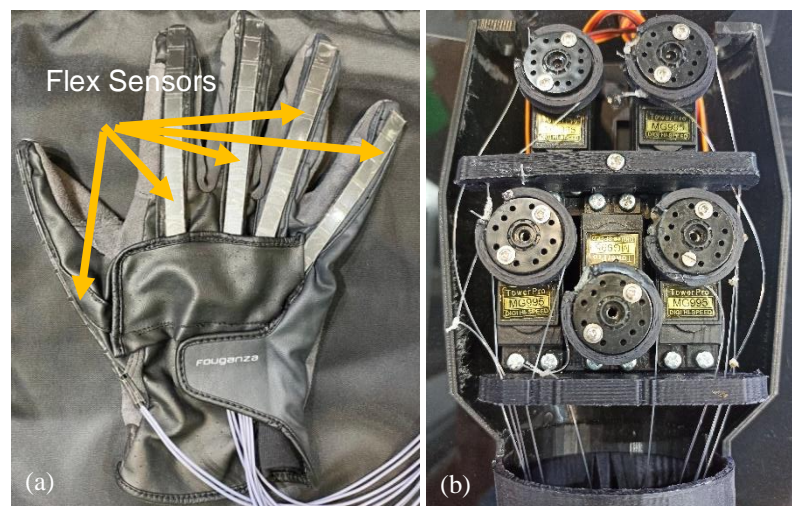


Figure 1. (a) Glove, (b) Servo motors

2.1.2. Collaborative robot arm

As an alternative to standard industrial robots working at high speeds with safety equipment, collaborative robots that operate at lower speeds (250 mm/sec) but can work in the same environment with humans without the need for any safety equipment are preferred in studies involving human interaction. In this study, 6 axis RV-5AS-D model Mitsubishi Electric collaborative robot arm model was used. It has a reach of 910 mm, a carrying capacity of 5 kg and a position repeatability of 0.03 mm. It has advanced torque sensing feature with J5 series Mitsubishi electric servo motors used in each axis, so it stops suddenly in case of any contact during operation. Apart from the collaborative working mode of the robot, there is also a high-speed operation mode (1000 mm/sec), this feature can be used by selecting the robot working area from the scanning sensors or the program. Thanks to the CC-Link IE Field Basic communication built into it, the data exchange in the project is provided with the communication feature over the directly assigned fields with the PLC. The axis characteristics and reach of the robot arm are presented in Table 2.

Table 2. Robot arm reach distance

Axis	Axis Motion Range (Degree)
J1	±240°
J2	±148°
J3	±150°
J4	±240°
J5	±120°
J6	±200°

2.1.3. Experimental setup

The experimental setup in which the remote robot arm control application is carried out is presented in Figure 2. It was established in Experimental Istanbul Expo Center and has fixed lighting in the indoor area.

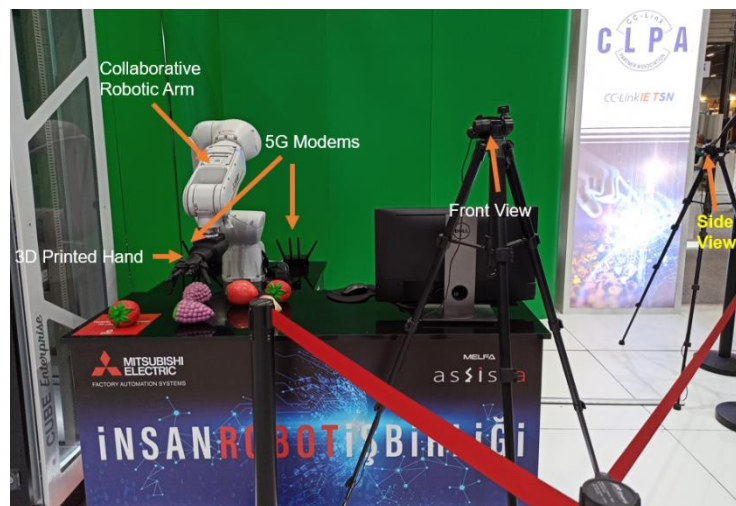


Figure 2. Experimental setup in which the control process is performed

2.1.4. Dataset preparation

The data set used in the study was created from images taken from two separate cameras. Both

cameras are identical and 640*480 images were taken. The front-view model was created with the images taken from the first camera, and the side-view model was created with the images taken from the second camera. The images taken from the camera also include the face area, but those parts were cropped while putting them into the paper. Images taken from two cameras at the same time were recorded separately. Target regions were obtained by labeling the obtained images. For front and side views, 808 images were collected for both views from 10 different people and two different models were trained. The tagging process was done on the makesense.ai website and the tags containing the region to be detected were saved as *.txt. Example images and labels (the region to be detected) for front and side views are presented in Figure 3.

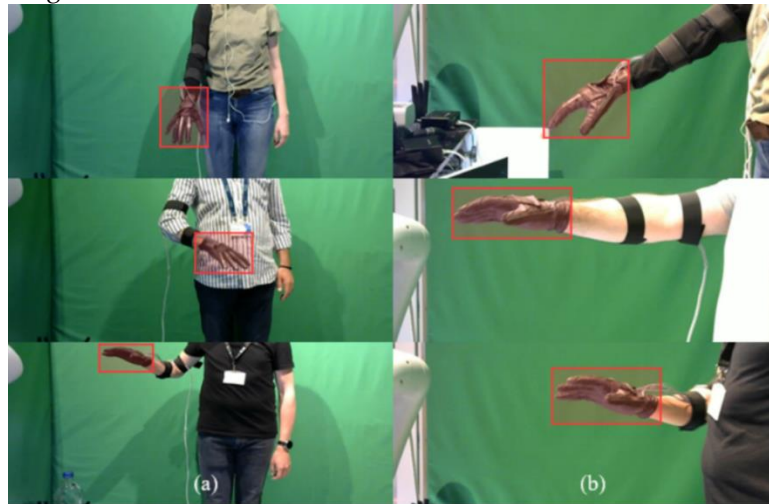


Figure 3. (a) Front view, (b) Side view

2.2. Method

Two different deep learning structures and communication methods were used in the study. YOLOv4 and YOLOv5 structures, which are used as deep learning structures, were compared in terms of training and test performances. The general scheme of the system used in the study is shown in Figure 4.

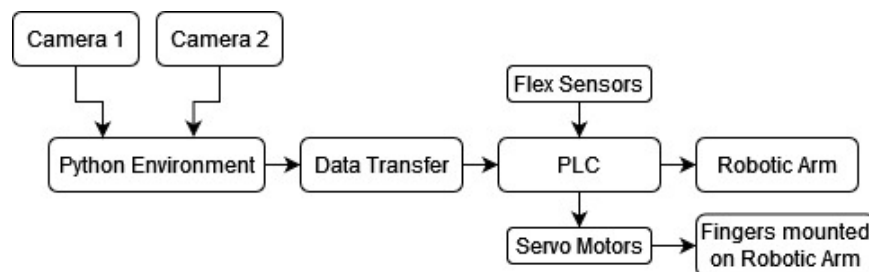


Figure 4. The general scheme of the system

The proposed method uses two cameras for hand position. The detected positions are transferred to PLC over Python. The PLC sends hand position data to the robotic arm. The PLC also reads analog inputs to detect glove finger positions to control the servo motors.

2.2.1. YOLO (You only look once)

Deep learning algorithms can perform object detection, classification, and object recognition with high accuracy. However, these algorithms require high processing power. The YOLO method, on the

other hand, is a technique that can detect real-time objects with high accuracy with low processing power and is based on CNN (Convolutional Neural Network). R-CNN model, which is one of the other popular deep learning algorithms, analyzes each region with a network structure after dividing the image into regions. YOLO, on the other hand, presents the image to the structure once and then divides the image into grids. Searches for the object within each grid. In this way, the processing time is shortened, and the accuracy rate increases [34]. Grid and object search stages are shown in Figure 5.

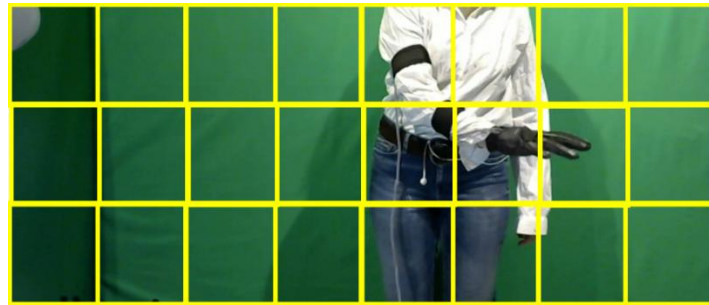


Figure 5. The grids and object searching process

The YOLO algorithm generates a confidence score for each grid. The confidence score includes the probability of detecting the object in the grid and the box surrounding the object. Intersection of Union (IoU), Precision (P), Recall (R), F1-Score, Mean Average Precision (mAP) and detection speed metrics are used for performance measurement of the YOLO algorithm. The IoU metric indicates how closely the tagged region (A) in the training data and the region (B) predicted by the training result intersect. An IoU value above 0.5 indicates a successful detection process. In cases where the IoU value is above 0.5, the frame number is calculated as TP (True Positive), while values below 0.5 are calculated as FP (False Positive). In cases where no frames are found, the frame count is calculated as FN (False Negative). Metric equations appear in Equation 1-5.

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1 - score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

$$mAP = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k AP_i, \text{ where } AP_k = \int_0^1 P_k(R_k) dR_k \quad (5)$$

The YOLOv4 algorithm runs on the Darknet framework and was developed with C/CUDA. Therefore, the Darknet framework has been downloaded and installed in the working environment for training and testing processes. CUDA-GPU connection was made by defining GPU (Graphical Processing Unit). Thanks to this process, the images taken are working on the GPU, and FPS (frame per second) values are obtained by performing high-speed image processing.

The YOLOv5 algorithm emerged shortly after YOLOv4 was published. While YOLOv4 works on Darknet, which was developed in C language, YOLOv5 was developed with PyTorch library. The advantage of YOLOv5 over YOLOv4 is that the trained network file is much smaller and thus training can be performed in a shorter time. The output vector of a YOLO algorithm includes information “p” (object present-not present information in grid), “x center”, “y center”, “width”, “height”, and “class information” [18]. The structure of the YOLOv5 algorithm is presented in Figure 6.

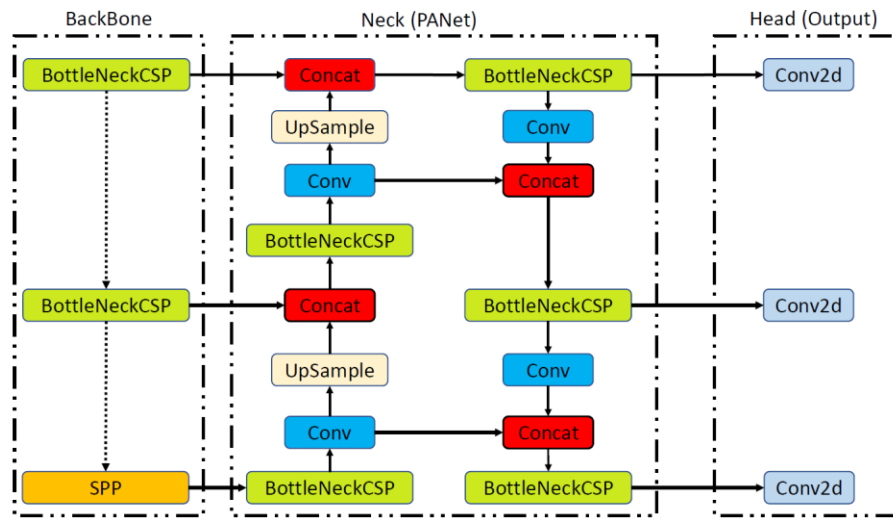


Figure 6. YOLOv5 structure

In the Backbone region seen in Figure 6, the properties of the input images (color, edge, contrast, etc.) are extracted. The model detects objects using these features. The features represent image data with high accuracy and low loss. The Neck area is placed between the Backbone and the Head. Features from the Backbone region are used for the task of detecting possible objects located in the Neck region. There may be many possible objects in the Neck region. The possible objects detected needs a classification process. This classification process is implemented in Head part. Head performs the detection process by classifying the objects [18].

2.2.2. The calibration of camera-robotic arm

Two cameras were used to take images in the experimental environment. The first camera looks at the operator and extracts the hand position information. As a result of the YOLO vector, “x center pixel” information is used to control the “Y axis” of the robot, and “y center pixel” information is used to control the “Z axis” of the robot. The second camera, on the other hand, extracts hand position information by looking from the side. The “x center pixel” information in the YOLO vector result is used to control the “X axis” of the robot. By using the position information from the camera, the robot arm-camera calibration was performed to move the robot arm at the desired level. The “x pixel” change in the first camera is between 250~370 pixels in the image. In this range, the robot arm moves between the position of -180~+300 mm in the “Y-axis”. In any information coming out of the range of 250~370, the robot arm does not go beyond the limit of -180~+300 mm. In the first camera, the “y-pixel” change is between 50~450 pixels in the image. In this range, the robot arm moves between +150~+425 mm position in the “Z axis”. In any information coming out of the range of 50~450, the robot arm does not go beyond the limit of -150~+425 mm. In the second camera, the “x pixel” change is between 130~400 pixels in the image. In this range, the robot arm moves between the +280~+480 mm position on the “X-axis”. In any information coming out of the range of 130~400, the robot arm does not go beyond the limit of +280~+480 mm.

The conversion of pixel information to robot position information in the real world for each axis was done by linear regression and camera pixel value was converted to robot arm position information. The transformation equation and R^2 value obtained for each axis because of the linear regression process are shown in Equation 6-8.

$$\text{Front View x axis} \rightarrow \text{Robot y axis, } \text{Robot}_y = 4 * \text{camera}_x - 1180, R^2=1 \quad (6)$$

$$\text{Front View y axis} \rightarrow \text{Robot z axis, } \text{Robot}_z = 0.6875 * \text{camera}_y + 115.63, R^2=1 \quad (7)$$

$$\text{Side View x axis} \rightarrow \text{Robot x axis, } \text{Robot}_x = 0.7407 * \text{camera}_x + 183.7, R^2=1 \quad (8)$$

2.2.3. The calibration of glove-servo motors

PLC is one of the most durable hardware products that adapt to the industrial environment and has many features. The purpose of using PLC in this study is to read analog data and move motors with fast outputs. Five flex sensor data on the glove was read with Mitsubishi Electric brand FX5U series PLC and ADP485 analog module. The read data was sent to the servo motors as position information using the fast outputs of the PLC and the servo motors were moved to the desired position (fully open - fully closed - intermediate points). Linear Regression method was used in the conversion of analog information to servo motor position information. In the study, a separate estimation equation was created for each finger by finding the relationship between the analog information read from the flex sensors and the position information. When the operator changes, the analog information changes in the open and closed state of the hand. When the operator wearing the glove was changed, the calibration process was performed using the obtained regression equations and the fingers were fully opened and closed each time. The equations and R2 values obtained for each finger are as follows:

$$\text{Thumb finer equation} \rightarrow \text{Motor 1 position} = \text{Analog input 1} * 0.17 + 1600, R^2=1 \quad (9)$$

$$\text{Forefinger equation} \rightarrow \text{Motor 2 position} = \text{Analog input 2} * 0.19 + 1610, R^2=1 \quad (10)$$

$$\text{Middle finger equation} \rightarrow \text{Motor 3 position} = \text{Analog input 3} * 0.18 + 1662, R^2=1 \quad (11)$$

$$\text{Ring finger equation} \rightarrow \text{Motor 4 position} = \text{Analog input} * 0.17 + 1666, R^2=1 \quad (12)$$

$$\text{Little finger equation} \rightarrow \text{Motor 5 position} = \text{Analog input} * 0.25 + 1548, R^2=1 \quad (13)$$

2.2.4. The system operation

This section explains the Python-Robot arm communication flow, robot arm movement and hand control with PLC. The detailed scheme of the work carried out is shown in Figure 7.

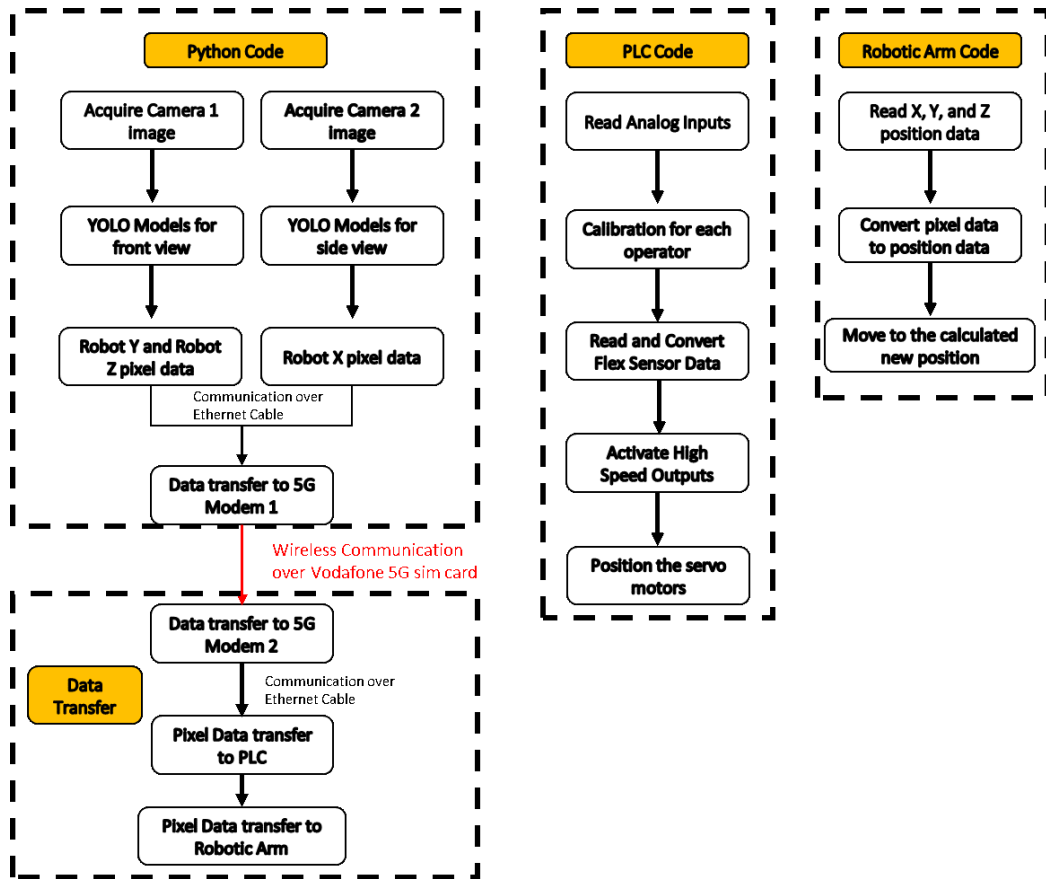


Figure 7. The block diagram of the system setup

After the operator puts on the gloves, first the calibration process is done manually, and the system starts to operate. Two cameras are started to find hand position. The hand is detected by YOLO methods, and the center of the hand area is sent to PLC. Y and Z data is obtained from the Camera 1, and the X data is obtained from Camera 2. X, Y and Z position information from image processing is transferred to Robot Arm via PLC via 5G communication. Two 5G modems were used for data transfer. The first modem is connected to the computer, and the second modem is connected to the PLC. The data is written to the first modem from Python and sent to the second modem. The PLC reads data from the second modem and send to the robot arm. The robot arm reads the incoming position information and moves towards the position. While moving towards the position, when a movement in the opposite direction is received, it stops and moves towards the new position. When there is not any movement, if the operator is standing still in front of the camera, it has been observed that the incoming information varies between 1-4 pixels. Therefore, the robot arm does not execute the motion command unless there is a pixel difference of more than 5 pixels. In this way, the robot arm is prevented from moving while the operator is stationary. When the operator moves his hand over the object to be taken, he closes his fingers and grabs the object and lifts it.

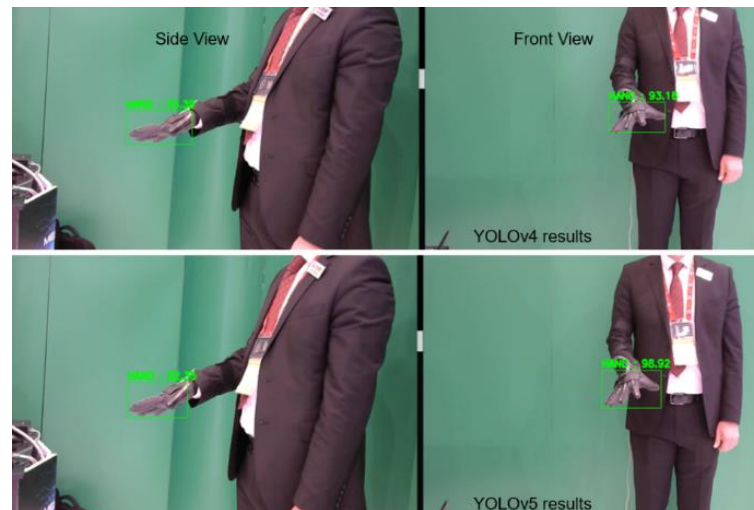
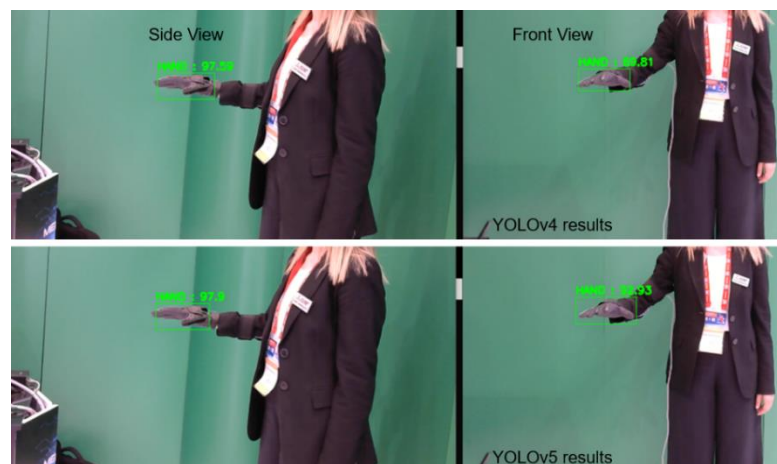
3. RESULTS AND DISCUSSION

In the YOLOv4 training phase, a computer with an Intel i7-8700 processor, Nvidia GTX 1080 graphics card and 32 GB RAM was used, and the training process was carried out on the GPU. The configuration file was configured in accordance with the data set and the training process was carried out. The YOLOv5 model was trained on the Google COLAB system. The Precision, Recall, F1-Score, mAP and IoU values obtained during the training process are presented in Table 3.

Table 3. Training results of YOLOv4 and YOLOv5

Evaluation Metric	Side View		Front View	
	YOLOv4 Result	YOLOv5 Result	YOLOv4 Result	YOLOv5 Result
Precision	1.00	0.975	1.00	0.99964
Recall	1.00	1.00	1.00	1.00
mAP@0.5	1.00	0.99	1.00	0.995
IoU	0.842	0.857	0.8604	0.9238
Training Time	12.52 h (GPU)	4.7 h (COLAB)	12.5 h (GPU)	4.7 h (COLAB)

Table 3 shows that YOLOv5 showed higher performance than YOLOv4 in front and side camera image training. After the training process was completed, the models obtained for the two cameras were recorded. Each model has been tested in real time for both cameras. Visual test results of images from two cameras for YOLOv4 and YOLOv5 are presented in Figure 8-11.

**Figure 8.** Comparative results for Test 1**Figure 9.** Comparative results for Test 2

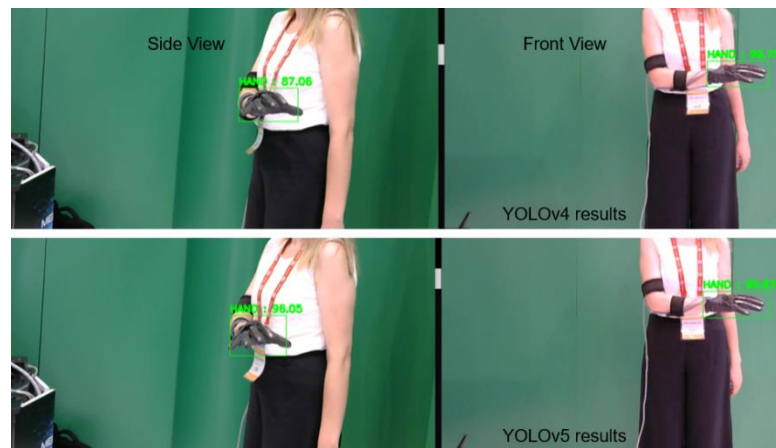


Figure 10. Comparative results for Test 3

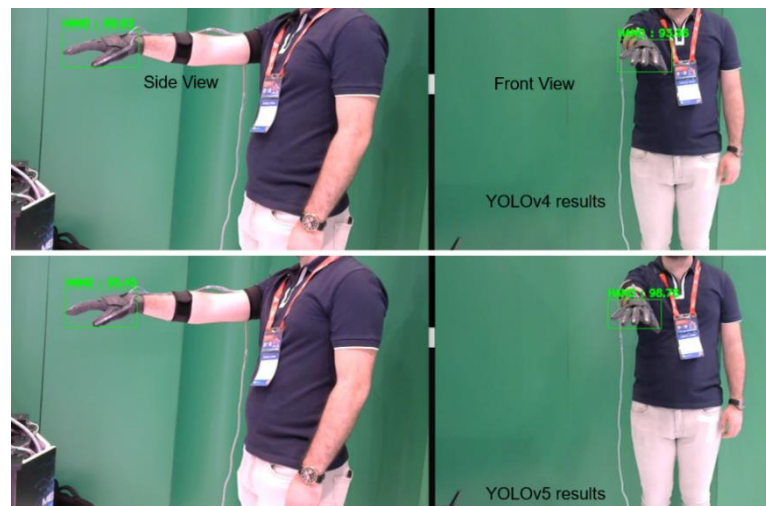


Figure 11. Comparative results for Test 4

Although training environments of YOLOv4 and YOLOv5 are different, the two models were tested on the same environment (Nvidia GTX 1080 graphics card). Four of the test results obtained in real time are presented in Table 4.

Table 4. Test results of YOLOv4 and YOLOv5

Evaluation Metric (Confidence Score)	Side View		Front View	
	YOLOv4 Result	YOLOv5 Result	YOLOv4 Result	YOLOv5 Result
Test 1	55.39	82.35	93.16	98.92
Test 2	97.59	97.9	69.81	92.93
Test 3	87.06	96.06	99.75	99.83
Test 4	89.93	95.45	93.96	98.75
FPS (CPU)	5.55	7.14	5.55	7.14
FPS (GPU)	44.54	81.3	44.54	81.3

Table 4 shows that the YOLOv5 algorithm gave higher performance than YOLOv4 in terms of training and test success on the dataset used in this study. While detection rates of 55.39% and 69.81% could be seen in YOLOv4, the detection rate did not fall below 80% in YOLOv5. Looking at the FPS

numbers, it has been reported that the graphics card performs approximately 10 times the operation on the hardware where this work is performed, according to the processor. During the testing process, robot arm control and bin picking process are presented step by step in Figure 12.

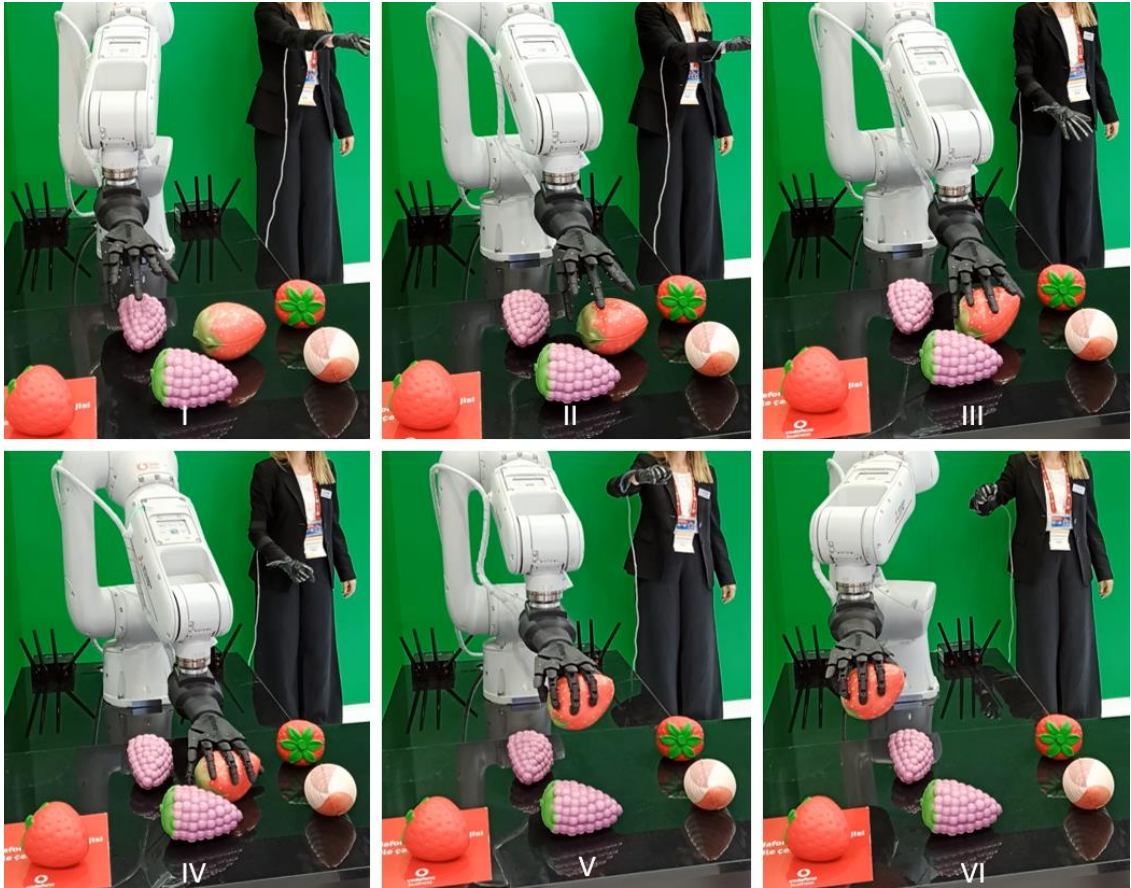


Figure 12. Robot motion according to the arm position

- I. The operator directs the robot arm.
- II. The robot arm moves in the desired direction and is located top of the bin.
- III. When the robot arm is on top of the bin, the operator lowers the robot arm.
- IV. When the robot arm comes over the product, the operator closes his hand and picks the bin.
- V. Operator raises the closed hand and robot arm lifts bin.
- VI. The operator directs the robot and place the bin at the drop zone

4. CONCLUSIONS

With 5G communication, remote quick control operations are made possible. By sending robots to dangerous areas where human hands cannot enter or where humans cannot go, it will be possible to solve problems more quickly and easily. When the problem-solving ability of humans and the knowledge and experience of the workforce are taught to robots, it will be possible for robots to work in the same environment with humans. For this purpose, the factories of the future should focus on the flexible development of production technologies for humans to work with robots. With the new phase of factory automation, production theories in factories will change. Trained and controllable collaborative robots will take part in the development of production theories. With this study, the infrastructure works of the factories of the future have started. Since the factories of the future will be equipped with artificial intelligence systems, the integration of artificial intelligence-factory automation has become an

important issue. The YOLO algorithm, which is used in various fields and shows real-time high performance, is an algorithm that can be integrated into factory automation. In Table 5, YOLO methods studied on different subjects and successful results are presented.

In the next stage of this R&D work, the servo motors in the hand model will be replaced with industrial servo motors. The hand model extracted from the 3D printer will be updated. In this study, 3-axis control has been provided, and in future studies, necessary software and hardware additions will be made for 6-axis control. In addition, a sensor will be placed on the fingertip in each hand model and a haptic sensor hand structure will be developed, which will provide feedback to the user. For remote control, virtual reality glasses, in which camera images are transferred to the user, will be added to the system and the user and robot environment will be made independent of each other.

Table 5. The results of literature studies

Paper	Detected object	Method	mAP (%)
[9]	Wheat Heads	YOLOv5	71.92
		Faster-RCNN	70.85
[11]	Leaf Disease	YOLOv5	94.48
[13]	Hand	YOLOv3	71.2
		YOLOv4	72.3
		YOLOv5	75.3
[14]	Aggregate	YOLOv4	99.62
		YOLOv5	99.6
[16]	Insect on Soybean Crop	YOLOv4	94
		YOLOv5	99.5
[15]	Leaf Disease	YOLOv4	90.7
		YOLOv5	90.7
[20]	Helmet Detection	YOLOv5	93.8
[19]	Helmet Detection	YOLOv3	41.7
		YOLOv4	76.93
		YOLOv5	86.87
[22]	Drone Images	YOLOv3	82.3
		YOLOv4	81.5
		YOLOv5	91.3
[26]	Pantry Objects	YOLOv5	94
[27]	Infrared Image Objects	YOLO-FIRI	98.5
[28]	Brain Tumors	YOLOv3	84.3
		YOLOv4	88.71
		YOLOv5	95.07
[29]	Ship Types	YOLOv4	49.5
		YOLOv5	56.8
[31]	Traffic Signs	SSD	90.14
		YOLOv5	97.7
[33]	Face Mask	Mask R-CNN	74.71
		YOLOv4	68.22
		YOLOv5	65.5
This study	Hand Dataset	YOLOv4	86.04
		YOLOv5	92.38

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they have no declaration of ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

The first author has contributed the writing of the paper, hand detection software, and PLC code.

The second author has contributed the writing of the robotic arm code.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests:

The first author reports equipment, drugs, or supplies and travel were provided by Mitsubishi Electric Turkey. The second author reports administrative support and equipment, drugs, or supplies were provided by Mitsubishi Electric Turkey

Funding / Acknowledgements

We would like to thank Can Tolga Bizel, who supported us in the realization of this work, and Mitsubishi Electric Türkiye, who funded us to use the products.

Data Availability

The research data is not available.

10. REFERENCES

- [1] X. Chen, X. Huang, Y. Wang, and X. Gao, "Combination of augmented reality based brain-computer interface and computer vision for high-level control of a robotic arm," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 28, no. 12, pp. 3140-3147, 2020.
- [2] Z. Zhang, Y. Huang, S. Chen, J. Qu, X. Pan, T. Yu, and Y. Li, "An intention-driven semi-autonomous intelligent robotic system for drinking," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 11, p. 1-14, 2017.
- [3] S. M. Achari, S. G. Mirji, C. P. Desai, M. S. Hulasogi, and S. P. Awari, "Gesture based wireless control of robotic hand using image processing," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 3340-3345, 2018.
- [4] J. O. P. Arenas, R. J. Moreno, and R. D. H. Beleño, "Convolutional neural network with a dag architecture for control of a robotic arm by means of hand gestures," *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 11, no. 12, pp. 547-557, 2018.
- [5] P. Atre, S. Bhagat, N. Pooniwala, and P. Shah, "Efficient and feasible gesture controlled robotic arm," in *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*, 2018, pp. 1-6: IEEE.
- [6] A. A. Malik and A. J. R. Brem, "Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 68, pp. 1-16, 2021.
- [7] J. P. Vasconez, G. A. Kantor, and F. A. A. Cheein, "Human-robot interaction in agriculture: A survey and current challenges," *Biosystems engineering*, vol. 179, pp. 35-48, 2019.
- [8] K. Fujii, G. Gras, A. Salerno, and G.-Z. Yang, "Gaze gesture based human robot interaction for laparoscopic surgery," *Medical image analysis*, vol. 44, pp. 196-214, 2018.
- [9] M. N. Datta, Y. Rathi, and M. Eliazar, "Wheat heads detection using deep learning algorithms," *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, vol. 25, no.5, pp. 5641-5654, 2021.
- [10] F. Jubayer, J. A. Soeb, A. N. Mojumder, M. K. Paul, P. Barua, S. Kayshar, S. S. Akter, M. Rahman, and A. Islam, "Detection of mold on the food surface using YOLOv5," *Detection of mold on the food surface using YOLOv5*, vol. 4, pp. 724-728, 2021.
- [11] M. Karakaya, M. F. Celebi, A. E. Gök, and S. Ersoy, "Discovery Of Agricultural Diseases By Deep Learning And Object Detection," *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 163-173, 2022.

- [12] R. Li and Y. J. E. Wu, "Improved YOLO v5 Wheat Ear Detection Algorithm Based on Attention Mechanism," *Electronics*, vol. 11, no. 11, pp. 1673-1694, 2022.
- [13] C. A. Owusu-Agyei and J. Hou, "Hands Activities Detection in Egocentric Interactions Using YOLOv5," in *2021 International Conference on UK-China Emerging Technologies*, 2021, pp. 199-203: IEEE.
- [14] S. Yuan, Y. Du, M. Liu, S. Yue, B. Li, and H. Zhang, "YOLOv5-Ytiny: A Miniature Aggregate Detection and Classification Model," *Electronics*, vol. 11, no. 11, pp. 1743-1758, 2022.
- [15] M. P. Mathew and T. Y. Mahesh, "Leaf-based disease detection in bell pepper plant using YOLO v5," *Signal, Image and Video Processing*, vol. 16, no. 3, pp. 841-847, 2022.
- [16] S. Verma, S. Tripathi, A. Singh, M. Ojha, and R. R. Saxena, "Insect Detection and Identification using YOLO Algorithms on Soybean Crop," in *TENCON 2021-2021 IEEE Region 10 Conference*, 2021, pp. 272-277: IEEE.
- [17] B. Yan, P. Fan, X. Lei, Z. Liu, and F. Yang, "A real-time apple targets detection method for picking robot based on improved YOLOv5," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 9, pp. 1619-1642, 2021.
- [18] Y. Hathat, D. Samai, A. Benlamoudi, K. Bensid, and A. Taleb-Ahmed, "SNCF workers detection in the railway environment based on improved YOLO v5," in *7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications*, 2022, pp. 1-7: IEEE.
- [19] M.E. Otgonbold, M. Gochoo, F. Alnajjar, L. Ali, T. H. Tan, J. W. Hsieh, and P. Y. Chen, "SHEL5K: an extended dataset and benchmarking for safety helmet detection," *Sensors*, vol. 22, no. 6, pp. 2315-2338, 2022.
- [20] M. Sadiq, S. Masood, and O. Pal, "FD-YOLOv5: A Fuzzy Image Enhancement Based Robust Object Detection Model for Safety Helmet Detection," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 24, pp. 2600-2616, 2022.
- [21] K. Ding, X. Li, W. Guo, and L. Wu, "Improved object detection algorithm for drone-captured dataset based on yolov5," in *2nd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering*, 2022, pp. 895-899: IEEE.
- [22] L. Li, Z. Yao, Z. Miao, X. Qiu, and X. Yang, "YOLO-A2G: An air-to-ground high-precision object detection algorithm based on YOLOv5," in *6th International Conference on Machine Vision and Information Technology*, 2022, pp. 1-8:IOP Publishing.
- [23] U. Nepal and H. Eslamiat, "Comparing YOLOv3, YOLOv4 and YOLOv5 for autonomous landing spot detection in faulty UAVs," *Sensors*, vol. 22, no. 2, pp. 464-479, 2022.
- [24] V. Slyusar, M. Protsenko, A. Chernukha, V. Melkin, O. Biloborodov, M. Samoilenko, O. Kravchenko, H. Kalynychenko, A. Rohovyi, and M. Soloshchuk, "Improving The Model Of Object Detection On Aerial Photographs And Video In Unmanned Aerial Systems," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 9, pp. 115-126, 2022.
- [25] X. Zhu, S. Lyu, X. Wang, and Q. Zhao, "TPH-YOLOv5: Improved YOLOv5 based on transformer prediction head for object detection on drone-captured scenarios," in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2021, pp. 2778-2788.
- [26] L. A. J. Abel, T. C. N. Oconer, and J. C. D. Cruz, "Realtime Object Detection of Pantry Objects Using YOLOv5 Transfer Learning in Varying Lighting and Orientation," in *2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology*, 2022, pp. 1-7: IEEE.
- [27] S. Li, Y. Li, Y. Li, M. Li, and X. Xu, "YOLO-FIRI: Improved YOLOv5 for Infrared Image Object Detection," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 141861-141875, 2021.
- [28] N. M. Dipu, S. A. Shohan, and K. A. Salam, "Brain Tumor Detection Using Various Deep Learning Algorithms," in *International Conference on Science & Contemporary Technologies*, 2021, pp. 1-6: IEEE.
- [29] J.-H. Kim, N. Kim, Y. W. Park, and C. S. Won, "Object Detection and Classification Based on YOLO-V5 with Improved Maritime Dataset," *Journal of Marine Sciences and Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 377-391, 2022.

- [30] W. Wahyono, A. Harjoko, A. Dharmawan, G. Kosala, and P. Y. Pranata, "A Comparison of Deep Learning Methods for Vision-based Fire Detection in Surveillance System," in *The 5th International Conference on Future Networks & Distributed Systems*, 2021, pp. 1-7.
- [31] Y. Zhu and W. Q. Yan, "Traffic sign recognition based on deep learning," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, no. 13, pp. 17779-17791, 2022.
- [32] A. S. Hemanth, "Face Mask Detection Using YOLOv5," *International Journal of Novel Research Development*, vol. 7, no. 5, pp. 390-395, 2022.
- [33] N. Ottakath, O. Elharrouss, N. Almaadeed, S. A. Maadeed, A. Mohamed, T. Khattab, K. Abualsaud, "ViDMASK dataset for face mask detection with social distance measurement," *Displays*, vol. 73, p. 102235, 2022.
- [34] A. Bochkovskiy, C. Y. Wang, and H. Y. M. Liao, "Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection," *arXiv:2004.10934*, 2020.



INVESTIGATION OF PHYSICOCHEMICAL AND THERMAL PROPERTIES OF CLAY-HYDROGEL COMPOSITES

¹Firdevs ÇİRLİ , ²Gülcihan GÜZEL KAYA , ³Hüseyin DEVECİ 

*Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Chemical Engineering Department,
Konya, TÜRKİYE*

¹firdevscirli@gmail.com, ²ggkaya@ktun.edu.tr, ³hdeveci@ktun.edu.tr

Highlights

- Hydrogel composites were synthesized by free radical solution polymerization.
- Hydrogel composites were pH and temperature responsive materials.
- Sepiolite addition increased thermal stability of the hydrogel network.



INVESTIGATION OF PHYSICOCHEMICAL AND THERMAL PROPERTIES OF CLAY-HYDROGEL COMPOSITES

¹Firdevs ÇİRLİ , ²Gülcihan GÜZEL KAYA , ³Hüseyin DEVECİ 

*Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Chemical Engineering Department,
Konya, TÜRKİYE*

¹firdevscirli@gmail.com, ²ggkaya@ktun.edu.tr, ³hdeveci@ktun.edu.tr

(Received: 14.12.2022; Accepted in Revised Form: 23.02.2023)

ABSTRACT: Hydrogels are cross-linked polymeric networks which retain large amounts of water. The hydrogels with response capability to various stimuli such as pH and temperature have received great attention in many fields. In this study, hydrogels were synthesized by free radical solution polymerization through optimization of acrylamide/sodium acrylate mole ratio and ethylene glycol dimethacrylate content. With the addition of sepiolite as filler into the hydrogel network which had highest swelling percent, hydrogel composites were obtained. In the presence of 10 wt% sepiolite, maximum swelling percent was determined as approximately 10600%. Swelling properties of the hydrogel composite including 10 wt% sepiolite was investigated depending on pH, salt effect and temperature. With increasing pH value, swelling percent of the hydrogel composite showed an increase. At high temperatures, the hydrogel composite exhibited higher swelling percent. Swelling tests in 0.1 M NaCl, CaCl₂ and FeCl₃ solutions revealed that the lowest swelling percent was observed in 0.1 M FeCl₃ solution. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analyses verified successfully preparation of the hydrogel composites. Regular layers of the sepiolite in the hydrogel network which made water diffusion easily were shown by scanning electron microscopy (SEM) analyses. Thermogravimetric analyses (TGA) indicated that thermal stability of the hydrogel network was increased with the addition of sepiolite.

Keywords: *Sepiolite, Hydrogel, Swelling Ratio, Thermal Properties*

1. INTRODUCTION

Hydrogels are three dimensional polymer networks consisting of hydrophilic functional groups that make hydrogels water swelling materials. Swelling properties of hydrogels change depending on cross-linking degree, chemical composition, type of solvent and external stimulus [1]. Physically cross-linked hydrogels have reversible swelling ability under various stimuli such as pH, temperature, pressure, light, magnetic and electric field [2]. pH responsive hydrogels consist of ionizable pendant groups which alter hydrogel charge in case of pH changes. Formation of electrostatic interactions or repulsion forces in hydrogel network results in swelling or shrinkage of hydrogels, respectively [3]. Temperature responsive hydrogels are classified into two groups: (1) negative temperature responsive hydrogels which swell at temperatures below lower critical solution temperatures and (2) positive temperature responsive hydrogels which swell at temperatures above upper critical solution temperatures [4].

Hydrogel composites have received great attention in water treatment, biosensors, drug delivery, tissue engineering and implant industry [5]. In general, hydrogel composites have been prepared by four different methods: (1) gel formation in filler suspension, (2) in situ filler growth after gel formation, (3) filler impregnation after gel formation and (4) gel formation in the presence of filler as matrix or cross-linker [6]. To enhance mechanical properties, adsorption capacity, stimuli responsive ability, thermal stability and adhesion properties of hydrogel network, many fillers including carbon nanotubes, graphene, metals, metal oxides and clays have been used [7]. Recently, clays such as kaolin, bentonite, montmorillonite and sepiolite have been utilized in the preparation of hydrogel composites for different

applications in literature studies. Yılmaz, et al. [8]) prepared pH responsive poly(acrylamide-co-methacrylic acid) hydrogels including kaolin and investigated swelling behavior of the hydrogel composites in different pH values. Khan, et al. [9]) examined pharmaceutical contaminant removal capacity of montmorillonite-poly(methacrylic acid) hydrogel nanocomposites. Peighambaroust, et al. [10]) studied on dye removal performance of montmorillonite-carboxymethyl cellulose-g-polyacrylamide hydrogel nanocomposite. Thakur, et al. [11]) utilized xanthan gum-*cl*-poly(itaconic acid)-bentonite hydrogel nanocomposites for drug release. Saraydın, et al. [12]) prepared *N*-isopropyl acrylamide-itaconic acid-acrylamide hydrogels including sepiolite for enzyme immobilization.

Sepiolite ($\text{Mg}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_{4.8}\text{H}_2\text{O}$) is an abundant and low-cost clay consisting of two dimensional tetrahedral layers in addition to octahedral layers. Owing to discontinuity of octahedral layers, internal channels are formed in sepiolite structure that provides synergistic effects on its sorption ability [13]. Sepiolite has high surface area as well as $320 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ with surface functional groups. The active groups like Si-OH and -OH on the sepiolite surface increase compatibility between sepiolite and polymer matrix [14].

In this study, acrylamide-sodium acrylate hydrogels were synthesized by free radical solution polymerization. Optimum acrylamide-sodium acrylate molar ratio was determined depending on swelling tests in water through tea-bag method. Different amount of sepiolite was added to optimized monomer solution to prepare sepiolite-acrylamide-sodium acrylate hydrogel composites. Swelling properties of the hydrogel composites were examined as a function of pH and temperature. Their swelling ratio was also investigated in various saline solutions. Characterization of the samples was conducted by FTIR, SEM and TGA analyses to show the effect of sepiolite addition on the properties of acrylamide-sodium acrylate hydrogels.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Materials

Acrylamide as monomer was purchased from Merck. Sodium acrylate as monomer, ammonium persulfate as initiator, ethylene glycol dimethacrylate as cross-linker and *N,N,N',N'*-tetramethylethylenediamine as accelerator were purchased from Sigma-Aldrich. NaCl, CaCl₂ and FeCl₃ were obtained from Sigma-Aldrich to prepare saline solutions. The chemicals were used without further purification. Sepiolite was utilized as filler in the preparation of hydrogel composites.

2.2. Preparation of hydrogel composites

Acrylamide-sodium acrylate hydrogels were synthesized by free radical solution polymerization. First, acrylamide solution was prepared in distilled water, and then sodium acrylate was added with different mole ratio (acrylamide/sodium acrylate: 1-1; 1-2; 1-3; 2-1; 3-1). For cross-linking, ethylene glycol dimethacrylate (different content: 0.05 mL; 0.10 mL; 0.20 mL; 0.40 mL) was mixed with the monomer solution in the flask equipped with reflux condenser. The solution was stirred with 100 μL *N,N,N',N'*-tetramethylethylenediamine at about 50 °C after the addition of 0.01 g ammonium persulfate into the solution. The gelation was observed in a short time. Gel washing with distilled water three times was carried out at ambient conditions followed by gel drying at 50 °C.

To prepare hydrogel composites, different weight percent of sepiolite (1 wt%; 3 wt%; 5 wt%; 10 wt%) was added to solution after the incorporation of ethylene glycol dimethacrylate. Gel washing and drying steps were applied as mentioned above.

2.3. Swelling tests

Swelling tests of the hydrogel composites were conducted using tea-bag method in distilled water at room temperature. Moreover, swelling properties of the hydrogel composites were investigated at

different pH values (pH 2; pH 7; pH 9), in various salt solutions (0.1 M NaCl; 0.1 M CaCl₂; 0.1 M FeCl₃) and at different temperatures (25 °C; 30 °C; 40 °C; 50 °C). For swelling test, the tea-bag with dry hydrogel composite was dipped in distilled water or other solutions. At certain times, the tea-bag with wet hydrogel composite was wiped using a filter paper to remove excess liquid on the tea-bag and weighed. The swelling percent (S, %) was calculated using Eq. (1) [15]:

$$S (\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

where W_1 (g) and W_0 (g) is weight of the tea-bag with wet and dry hydrogel composite, respectively.

2.4. Characterizations

Chemical structure of the hydrogel composites were examined by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analyses on Bruker Vertex 70 spectrometer. Morphological characterization of the hydrogel composites were carried out through scanning electron microscopy (SEM) analyses by SM Zeiss LS-10 equipment. Before SEM analyses, surface of the hydrogel composites was coated with gold layer. Thermal properties of the hydrogel composites were investigated by thermogravimetric analyses (TGA) with heating rate of 10 °C min⁻¹ by METTLER STAR SW thermal analyzer.

3. RESULTS and DISCUSSIONS

3.1. Swelling properties

Swelling percent of the hydrogels with different acrylamide/sodium acrylate mole ratio is shown in Figure 1a. It was clear that swelling percent of the hydrogel significantly increased with increasing sodium acrylate mole ratio. Optimum acrylamide/sodium acrylate mole ratio was determined as 1-3. In the presence of high mole of sodium acrylate in the hydrogel network, hydrophilicity of the hydrogel increases due to -COO⁻ functional groups belonged to sodium acrylate monomer. An increase in hydrophilic groups of hydrogel structure provides to increase swelling percent [16].

Swelling percent of the hydrogel with 1-3 acrylamide/sodium acrylate mole ratio as a function of ethylene glycol dimethacrylate content is shown in Figure 1b. The highest swelling percent was indicated as about 10000% in the case of using 0.05 mL ethylene glycol dimethacrylate. The swelling percent of the hydrogel decreased, while ethylene glycol dimethacrylate content was increasing. It can be explained with possible formation of highly cross-linked hydrogel networks. Generally, high cross-linking in hydrogel structure behaves as a barrier against water diffusion; so swelling ratio of hydrogels can significantly decreases [17].

Swelling percent of the hydrogels with 1-3 acrylamide/sodium acrylate mole ratio and 0.05 mL of ethylene glycol dimethacrylate is shown depending on amount of sepiolite in Figure 2. In general, incorporation of optimum amount of sepiolite into hydrogel network has synergistic effects on the swelling properties of hydrogels due to internal channels of sepiolite as well as its -OH functional groups. However, more sepiolite in hydrogel network acts as a cross-linker that increases cross-linking density leading to decrease water diffusion [18]. An increase in swelling percent of the hydrogel was observed with increasing amount of sepiolite in this study. And also, an increase in amount of sepiolite provided fast reaching to equilibrium swelling point. For example, the hydrogel composite including 1 wt% sepiolite reached to equilibrium swelling point in ~500 min; whereas, the hydrogel composite reached to equilibrium swelling point in ~350 min in case of 10 wt% sepiolite addition.

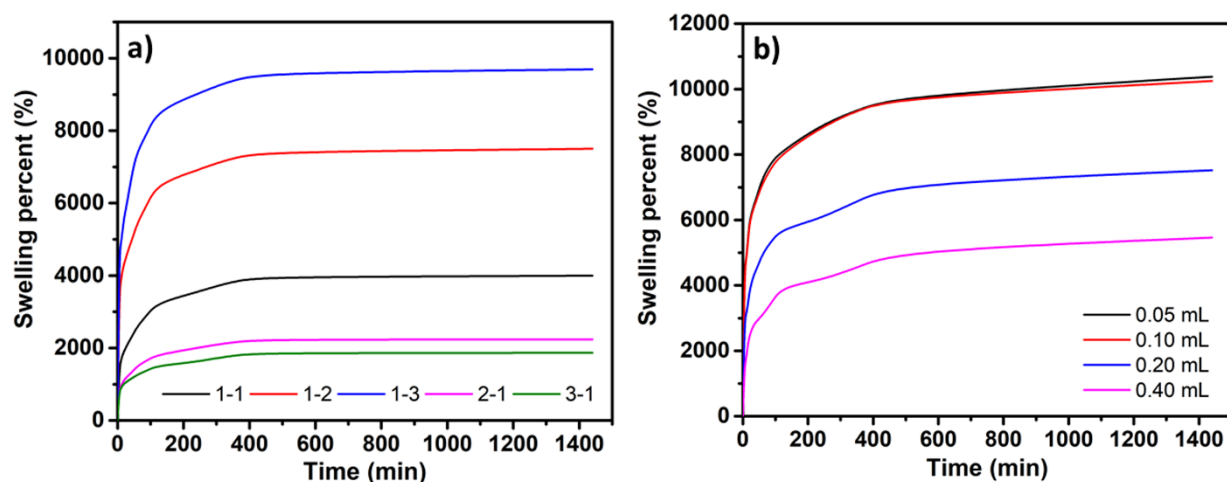


Figure 1. Swelling percent of the a) hydrogels with different acrylamide/sodium acrylate mole ratio and b) hydrogels with different content of ethylene glycol dimethacrylate in water

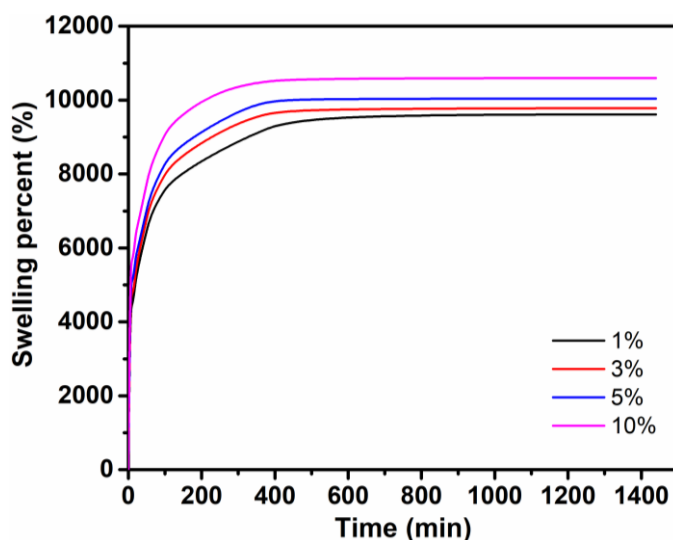


Figure 2. Swelling percent of hydrogel composites in water

Swelling percent of the hydrogel composite including 10 wt% sepiolite at different pH values is shown in Figure 3a. It was obvious that the lowest swelling percent of the hydrogel composite was observed at pH 2. At low pH, $-\text{COO}^-$ functional groups belonged to hydrogel networks tend to form hydrogen bonding that restricts their swelling [19]. With increasing pH, swelling percent of the hydrogel composite showed an increase. It was contributed to a decrease in interactions between $-\text{COO}^-$ groups at high pH values. Relaxation of hydrogel network chains makes diffusion of water molecules into hydrogel network easily which increases swelling percent of hydrogel [20].

It is known that osmotic pressure difference between salt solution and hydrogel network is one of the main factors affecting swelling capacity of hydrogel in salt solutions. Generally, shrinkage of hydrogels is determined depending on a decrease in the osmotic pressure difference which causes screening effect of cations belonged to the salt solutions. Also, complexation between cations with high ionic charge and carboxylate groups is too easy that limits relaxation of hydrogel network chains [21, 22]. Swelling percent of the hydrogel composite including 10 wt% sepiolite in different salt solutions with same concentration is shown in Figure 3b. Swelling percent of the hydrogel composite in NaCl and CaCl₂ solutions was almost same with its swelling percent in water. However, swelling capacity of the hydrogel composite significantly decreased in FeCl₃ solution. Compared to Na⁺ and Ca²⁺ ions, complexing ability of Fe³⁺ ions with $-\text{COO}^-$ groups is high that decreased water diffusion into the hydrogel composite structure.

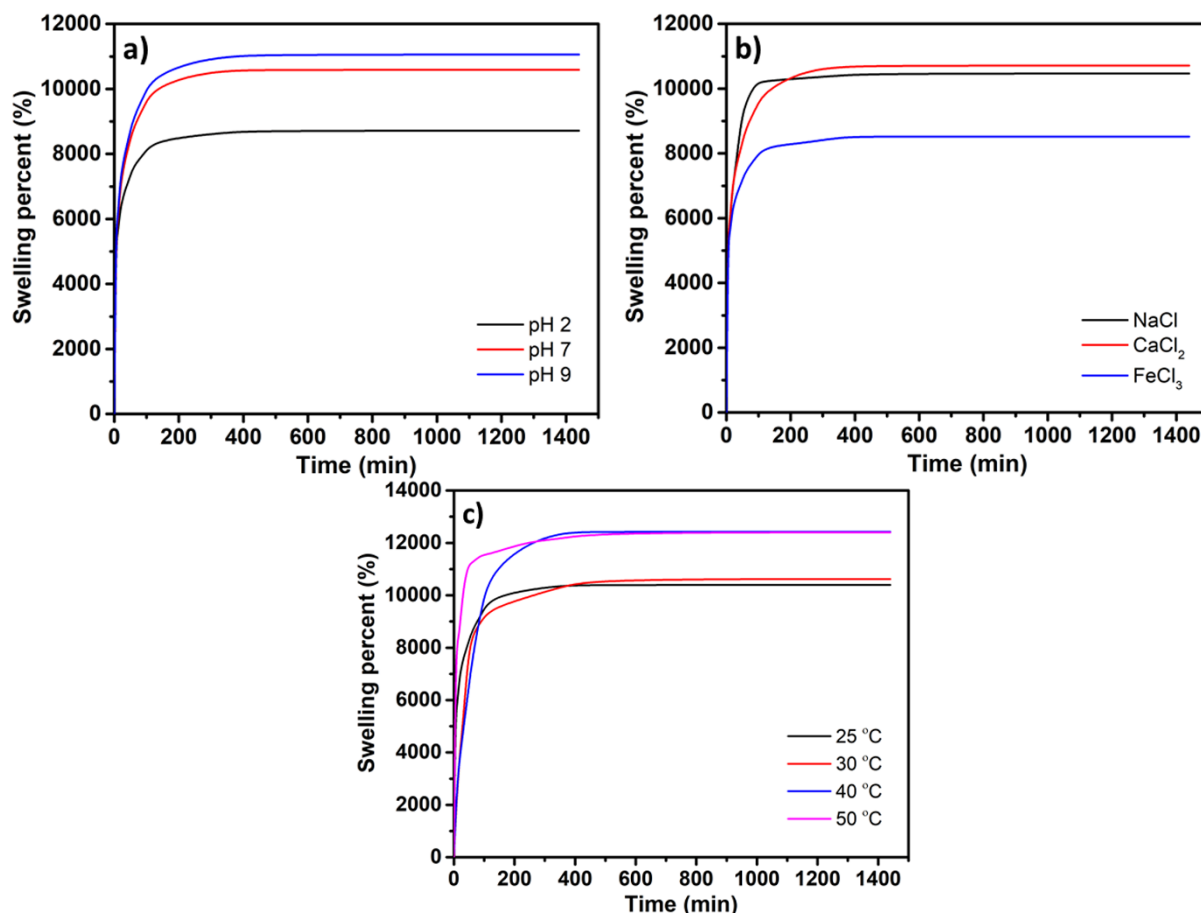


Figure 3. Swelling percent of the hydrogel composite including 10 wt% sepiolite under the effect of different **a)** pH values, **b)** salt solutions and **c)** temperatures

Swelling percent of the hydrogel composite including 10 wt% sepiolite as a function of temperature is shown in Figure 3c. The temperature rising up to 40 °C provided to increase swelling capacity of the hydrogel (~12000%) that was attributed to relaxation of hydrogel network chains as well as strong interactions of water molecules with –OH and –COO– functional groups of hydrogels [23, 24]. In case of 50 °C, a slight decrease in swelling percent of the hydrogel composite was identified. At high temperatures, water release can be dominant which decreases swelling capacity of hydrogels.

3.2. FTIR analyses

FTIR spectrum of the hydrogel and hydrogel composite including 10 wt% sepiolite shows successful synthesis of the materials (Figure 4). The peaks between 3400 cm⁻¹ and 3600 cm⁻¹ indicated –OH stretching vibrations [25]. The broad peaks centered on 3182 cm⁻¹ and 3343 cm⁻¹ were attributed to N-H stretching vibrations of amide groups [26]. C-H asymmetric stretching vibrations placed in hydrogel network chains and cross-linking points were observed at about 2932 cm⁻¹. The peak at 1663 cm⁻¹ was contributed to –OH stretching vibrations [27]. –COO– asymmetric and symmetric stretching vibrations were determined at 1549 cm⁻¹ and 1408 cm⁻¹, respectively [28]. The peak at 1450 cm⁻¹ was originated from C-N stretching vibrations which confirm amide groups. The peaks from 1100 cm⁻¹ to 1400 cm⁻¹ was related to C-N deformation vibrations and CH₂ groups in general [29]. The peak belonged to C-H bending vibrations was specified at 666 cm⁻¹. In spite of similar FTIR spectrum of the hydrogel and hydrogel composite, the peak

at 1058 cm^{-1} assigned to Si-O-Si bonds of sepiolite appeared in FTIR spectrum of the hydrogel composite [30].

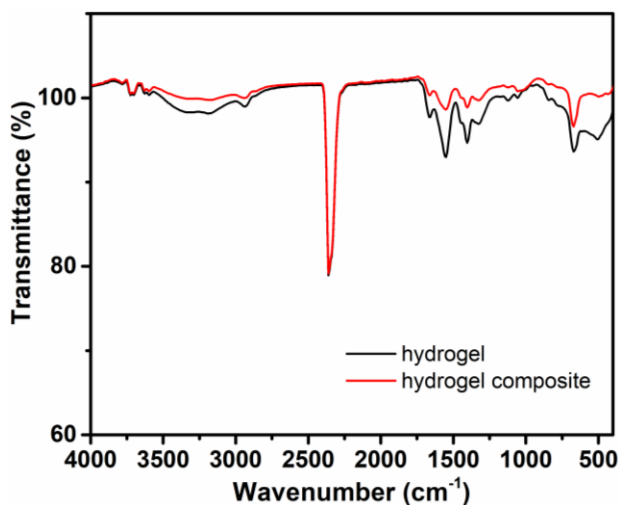


Figure 4. FTIR spectrum of the hydrogel and hydrogel composite including 10 wt% sepiolite

3.3. SEM analyses

SEM image of the hydrogel and hydrogel composite including 10 wt% sepiolite is shown in Figure 5. The hydrogel surface was smoother than that of the hydrogel composite (Figure 5a). In the presence of sepiolite, layered structure of the hydrogel composite with no agglomeration was observed (Figure 5b). Uniform dispersion of sepiolite and its layered structure had synergistic effects on the water diffusion into the hydrogel network. In literature studies, it is indicated that regular layers of clays in a hydrogel network generally increases swelling capacity of hydrogels [31, 32].

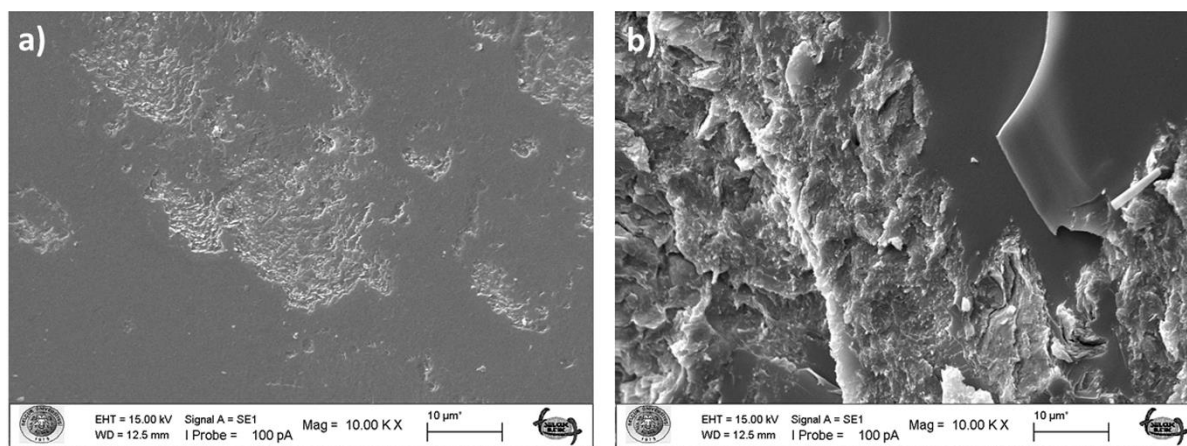


Figure 5. SEM image of the hydrogel and hydrogel composite including 10 wt% sepiolite

3.4. TGA analyses

TGA curve of the hydrogel and hydrogel composite including 10 wt% sepiolite is shown in Figure 6. Until $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, evaporation of water molecules from the samples resulted in mass loss [33]. The sharp decrease in the TGA curve of the hydrogel was observed at about $315\text{ }^{\circ}\text{C}$ that was related to decomposition of polymeric side chains [29]. The incorporation of sepiolite into the hydrogel network provided to

increase decomposition temperatures of the hydrogel network owing to the heat barrier effect of the sepiolite. The residue of the hydrogel at 600 °C was increased by 5% in the presence of sepiolite. Many studies in literature also reveal that the addition of clay type fillers has positive effects on the thermal stability of a hydrogel network [34-36].

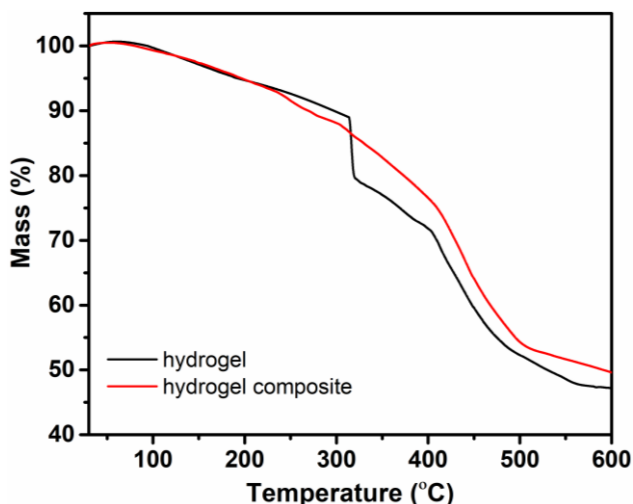


Figure 6. TGA curve of the hydrogel and hydrogel composite including 10 wt% sepiolite

4. CONCLUSIONS

In this study, the hydrogels were synthesized by free radical solution polymerization. First, the effect of acrylamide/sodium acrylate mole ratio and ethylene glycol dimethacrylate content on the swelling percent of the hydrogel in water was investigated. The highest swelling percent of the hydrogel was determined in the case of acrylamide/sodium acrylate mole ratio: 1-3 and ethylene glycol dimethacrylate content: 0.05 mL. With the incorporation of different amount of sepiolite (1 wt%; 3 wt%; 5 wt%; 10 wt%) into the hydrogel network, the hydrogel composites were successfully prepared. Swelling percent of the hydrogel increased with increasing amount of sepiolite. Moreover, the hydrogel composite reached to equilibrium swelling point with the 10 wt% sepiolite addition in a shorter time. Different swelling behaviour of the hydrogel composite at various pH values and temperatures showed that the hydrogel composite was pH and temperature responsive material. The lowest swelling percent of the hydrogel composite was identified in FeCl₃ solution when compared to NaCl and CaCl₂ solutions.

The presence of the characteristic peaks in the FTIR spectrum of the acrylamide-sodium acrylate based hydrogel composite was indication of the successfully preparation of the composite with the combination of hydrogel network and sepiolite. Layered structure of the hydrogel composite with no agglomeration was observed in the SEM image of the hydrogel composite. And also, TGA analyses revealed that sepiolite addition increased thermal stability of the hydrogel network.

The results showed that the hydrogel composite with the advantages such as high swelling percent, pH and temperature responsive ability and high thermal stability can be utilized in various fields such as tissue engineering, drug delivery and biosensors.

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

Firdevs Çirli: Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing-original draft. **Gülcihan Güzel Kaya:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing. **Hüseyin Deveci:** Conceptualization, Funding acquisition, Supervision, Writing – review & editing.

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 the Konya Technical University Coordinatorship of Scientific Research Projects (Grant number: 211016066).

Data Availability

Data will be made available on request.

REFERENCES

- [1] W. A. Laftah, S. Hashim, and A. N. Ibrahim, "Polymer Hydrogels: A Review," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 50, no. 14, pp. 1475-1486, 2011.
- [2] H. Huang, X. Qi, Y. Chen, and Z. Wu, "Thermo-sensitive hydrogels for delivering biotherapeutic molecules: A review," *Saudi Pharmaceutical Journal*, vol. 27, no. 7, pp. 990-999, 2019.
- [3] M. Champeau, D. A. Heinze, T. N. Viana, E. R. de Souza, A. C. Chinellato, and S. Titotto, "4D Printing of Hydrogels: A Review," *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 31, p. 1910606, 2020.
- [4] O. Erol, A. Pantula, W. Liu, and D. H. Gracias, "Transformer Hydrogels: A Review," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 4, p. 1900043, 2019.
- [5] E. Karadağ, H. Ödemiş, S. Kundakçi, and Ö. B. Üzüm, "Swelling Characterization of Acrylamide/Zinc Acrylate/Xanthan Gum/Sepiolite Hybrid Hydrogels and Its Application in Sorption of Janus Green B from Aqueous Solutions," *Advances in Polymer Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 248-259, 2016.
- [6] P. Lavrador, M. R. Esteves, V. M. Gaspar, and J. F. Mano, "Stimuli - Responsive Nanocomposite Hydrogels for Biomedical Applications," *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 8, p. 2005941, 2020.
- [7] S. Rafieian, H. Mirzadeh, H. Mahdavi, and M. E. Masoumi, "A review on nanocomposite hydrogels and their biomedical applications," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 154-174, 2019.
- [8] E. Yilmaz, G. Guzel Kaya, and H. Deveci, "Preparation and characterization of pH-sensitive semi-interpenetrating network hybrid hydrogels with sodium humate and kaolin," *Applied Clay Science*, vol. 162, pp. 311-316, 2018.
- [9] S. A. Khan, M. F. Siddiqui, and T. A. Khan, "Synthesis of Poly(methacrylic acid)/Montmorillonite Hydrogel Nanocomposite for Efficient Adsorption of Amoxicillin and Diclofenac from Aqueous Environment: Kinetic, Isotherm, Reusability, and Thermodynamic Investigations," *ACS Omega*, vol. 5, no. 6, pp. 2843-2855, 2020.
- [10] S. J. Peighambaroust, O. Aghamohammadi-Bavil, R. Foroutan, and N. Arsalani, "Removal of malachite green using carboxymethyl cellulose-g-polyacrylamide/montmorillonite

- nanocomposite hydrogel," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 159, pp. 1122-1131, 2020.
- [11] B. Thakur et al., "Designing of bentonite based nanocomposite hydrogel for the adsorptive removal and controlled release of ampicillin," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 319, p. 114166, 2020.
- [12] D. Saraydın, H. N. Öztop, and C. Hepokur, "Nanocomposite smart hydrogel based on sepiolite nanochannels/N-isopropyl acrylamide/itaconic acid/acrylamide for invertase immobilization," *Polymer-Plastics Technology and Materials*, vol. 60, no. 1, pp. 25-36, 2021.
- [13] H. N. Oztop, C. Hepokur, and D. Saraydin, "Acrylamide-sepiolite based composite hydrogels for immobilization of invertase," *Journal of Food Science*, vol. 74, no. 7, pp. N45-9, 2009.
- [14] R. R. Palem et al., "Physicochemical characterization, drug release, and biocompatibility evaluation of carboxymethyl cellulose-based hydrogels reinforced with sepiolite nanoclay," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 178, pp. 464-476, 2021.
- [15] S. Kordjazi, K. Kamyab, and N. Hemmatinejad, "Super-hydrophilic/oleophobic chitosan/acrylamide hydrogel: an efficient water/oil separation filter," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 3, no. 2, pp. 167-176, 2020.
- [16] E. Karadağ and Ö. B. Üzüüm, "A study on water and dye sorption capacities of novel ternary acrylamide/sodium acrylate/PEG semi IPN hydrogels," *Polymer Bulletin*, vol. 68, no. 5, pp. 1357-1368, 2011.
- [17] K. Kabiri, H. Omidian, S. A. Hashemi, and M. J. Zohuriaan-Mehr, "Synthesis of fast-swelling superabsorbent hydrogels: effect of crosslinker type and concentration on porosity and absorption rate," *European Polymer Journal*, vol. 39, no. 7, pp. 1341-1348, 2003.
- [18] F. Santiago, A. E. Mucientes, M. Osorio, and F. J. Poblete, "Synthesis and swelling behaviour of poly (sodium acrylate)/sepiolite superabsorbent composites and nanocomposites," *Polymer International*, vol. 55, no. 8, pp. 843-848, 2006.
- [19] Y. Huang, M. Zeng, J. Ren, J. Wang, L. Fan, and Q. Xu, "Preparation and swelling properties of graphene oxide/poly(acrylic acid-co-acrylamide) super-absorbent hydrogel nanocomposites," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 401, pp. 97-106, 2012.
- [20] Y. Bao, J. Ma, and N. Li, "Synthesis and swelling behaviors of sodium carboxymethyl cellulose-g-poly(AA-co-AM-co-AMPS)/MMT superabsorbent hydrogel," *Carbohydrate Polymers*, vol. 84, no. 1, pp. 76-82, 2011.
- [21] H. Namazi, M. Hasani, and M. Yadollahi, "Antibacterial oxidized starch/ZnO nanocomposite hydrogel: Synthesis and evaluation of its swelling behaviours in various pHs and salt solutions," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 126, pp. 578-584, 2019.
- [22] W. Tanan, J. Panichpakdee, and S. Saengsuwan, "Novel biodegradable hydrogel based on natural polymers: Synthesis, characterization, swelling/reswelling and biodegradability," *European Polymer Journal*, vol. 112, pp. 678-687, 2019.
- [23] K. S. V. P. Chandrika, A. Singh, A. Rathore, and A. Kumar, "Novel cross linked guar gum-g-poly(acrylate) porous superabsorbent hydrogels: Characterization and swelling behaviour in different environments," *Carbohydrate Polymers*, vol. 149, pp. 175-185, 2016.
- [24] M. R. Jozaghkar, A. Sepehrian Azar, and F. Ziaee, "Preparation, Characterization, and swelling study of N,N'-dimethylacrylamide/acrylic acid amphiphilic hydrogels in different conditions," *Polymer Bulletin*, vol. 79, no. 7, pp. 5183-5195, 2022.
- [25] Y. M. Mohan, J. P. Dickson, and K. E. Geckeler, "Swelling and diffusion characteristics of novel semi-interpenetrating network hydrogels composed of poly[(acrylamide)- co-(sodium acrylate)] and poly[(vinylsulfonic acid), sodium salt]," *Polymer International*, vol. 56, no. 2, pp. 175-185, 2007.
- [26] Y. M. Mohan, T. Premkumar, D. K. Joseph, and K. E. Geckeler, "Stimuli-responsive poly(N-isopropylacrylamide-co-sodium acrylate) hydrogels: A swelling study in surfactant and polymer solutions," *Reactive and Functional Polymers*, vol. 67, no. 9, pp. 844-858, 2007.

- [27] M. M. Ghobashy et al., "Characterization of Starch-based three components of gamma-ray cross-linked hydrogels to be used as a soil conditioner," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 260, p. 114645, 2020.
- [28] J. Zhang, L. Wang, and A. Wang, "Preparation and Swelling Behavior of Fast-Swelling Superabsorbent Hydrogels Based On Starch-g-Poly(acrylic acid-co-sodium acrylate)," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 291, no. 6, pp. 612-620, 2006.
- [29] F. B. Santos, N. T. Miranda, M. I. R. B. Schiavon, L. V. Fregolente, and M. R. Wolf Maciel, "Thermal degradation kinetic of poly(acrylamide-co-sodium acrylate) hydrogel applying isoconversional methods," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 146, no. 6, pp. 2503-2514, 2021.
- [30] A. Olad, M. Eslamzadeh, and A. Mirmohseni, "Ion crosslinked poly(acrylic acid-co-acrylamide)/poly(vinyl alcohol)/Cloisite 15A nanocomposite hydrogels as potential wound dressing films: Effect of clay content on water absorption kinetic and mechanical properties," *Polymer Composites*, vol. 40, no. 5, pp. 1762-1773, 2019.
- [31] S. Zhumagaliyeva, R. Iminova, G. Kairalapova, M. M. Beysebekov, M. K. Beysebekov, and Z. Abilov, "Composite Polymer-Clay Hydrogels Based on Bentonite Clay and Acrylates: Synthesis, Characterization and Swelling Capacity," *Eurasian Chemico-Technological Journal*, vol. 19, no. 3, p. 279, 2017.
- [32] R. Ianchis et al., "Novel Hydrogel-Advanced Modified Clay Nanocomposites as Possible Vehicles for Drug Delivery and Controlled Release," *Nanomaterials (Basel)*, vol. 7, no. 12, 2017.
- [33] S. G. Abd Alla, R. H. Helal, A. A. F. Wasfy, and A. W. M. El-Naggar, "Structure-property and swelling behavior of electron beam irradiated poly(vinyl alcohol)/acrylamide/sodium montmorillonite clay composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 121, no. 5, pp. 2634-2643, 2011.
- [34] E. Farid, E. A. Kamoun, T. H. Taha, A. El-Dissouky, and T. E. Khalil, "PVA/CMC/Attapulgit Clay Composite Hydrogel Membranes for Biomedical Applications: Factors Affecting Hydrogel Membranes Crosslinking and Bio-evaluation Tests," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 30, no. 11, pp. 4675-4689, 2022.
- [35] S. Datta Chaudhuri, A. Mandal, A. Dey, and D. Chakrabarty, "Tuning the swelling and rheological attributes of bentonite clay modified starch grafted polyacrylic acid based hydrogel," *Applied Clay Science*, vol. 185, p. 105405, 2020.
- [36] L. Bounabi, N. B. Mokhnachi, N. Haddadine, F. Ouazib, and R. Barille, "Development of poly(2-hydroxyethyl methacrylate)/clay composites as drug delivery systems of paracetamol," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. 33, pp. 58-65, 2016.



Bin_MRFOA: A NOVEL MANTA RAY FORAGING OPTIMIZATION ALGORITHM FOR BINARY OPTIMIZATION

*Gülnur YILDIZDAN 

Selcuk University, Kulu Vocational School, Konya, TÜRKİYE
gavsar@selcuk.edu.tr

Highlights

- A new binary version of the manta ray foraging optimization algorithm (Bin_MRFOA) was proposed for solving binary optimization problems.
- Bin_MRFOA was tested for eight different transfer functions on the classic test function, and the effect of transfer functions on performance was examined.
- The most successful version of Bin_MRFOA was run on eighteen CEC2005 benchmark functions, and the results were compared with the algorithms in the literature.
- The results revealed that Bin_MRFOA is a successful, competitive, and preferable algorithm.



Bin_MRFOA: A NOVEL MANTA RAY FORAGING OPTIMIZATION ALGORITHM FOR BINARY OPTIMIZATION

*Gülnur YILDIZDAN

Selcuk University, Kulu Vocational School, Konya, TÜRK YE
gavsar@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 23.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.03.2023)

ABSTRACT: Optimization problems occur in three different structures: continuous, discrete, and hybrid. Metaheuristic algorithms, which are frequently preferred in the solution of optimization problems today, are mostly proposed for continuous problems and are discretized with subsequent modifications. In this study, a novel binary version (Bin_MRFOA) of the manta ray foraging optimization algorithm, which was frequently used in the solution of continuous optimization problems before, was proposed to be used in the solution of binary optimization problems. The Bin_MRFOA was first tested on ten classical benchmark functions, and the effect of the transfer function on performance was examined by comparing the variants obtained using eight different transfer functions. Then the most successful Bin_MRFOA variant was run on the eighteen CEC2005 benchmark functions. The results were compared with the algorithms in the literature and interpreted with Wilcoxon signed-rank and Friedman tests, which are nonparametric tests. The results revealed that Bin_MRFOA is a successful, competitive, and preferable algorithm compared to the literature.

Key words: Binary Optimization, Manta Ray Foraging Optimization, S-shaped and V-shaped Transfer Functions

1. INTRODUCTION

Today, evolutionary computing has become an effective method of choice for solving complex optimization problems. Evolutionary computation is handled in two groups, evolutionary algorithms (EA) and swarm intelligence-based algorithms. EAs are nature-inspired algorithms (genetic algorithm, differential evolution algorithm, etc.), while swarm intelligence-based algorithms (particle swarm algorithm, bat algorithm, etc.) are inspired by the social behavior of animals to solve problems. Optimization problems appear in three different structures: continuous, discrete, or hybrid. Continuous problems can take an infinite number of input values in a given range and produce an infinite number of output values in response to these inputs. A binary optimization problem is represented as a binary-based problem space, and it is a type of combinatorial optimization problem. [1]. In continuous optimization, the search space is continuous and the search agents receive continuous values. In binary optimization, search agents scattered throughout the search space take the value "0" to represent absence and "1" to represent presence.

Many studies have been published in the literature to propose binary versions of metaheuristic algorithms. Korkmaz et al. developed the basic artificial algae algorithm using a new solution update rule and used it for solving binary optimization problems [2]. Wang et al. proposed the binary version of the chimpanzee optimization algorithm and used the proposed algorithm for the continuous optimization task [3]. Al-Tashi et al. proposed a binary algorithm using a hybrid of gray wolf optimization and particle swarm optimization for use in solving feature selection problems. [4]. Baş and Ülker proposed and used a binary version of the social spider algorithm for continuous optimization [5]. Aslan et al. proposed a novel optimizer predicated on the Jaya algorithm and the xor logic operator and tested this algorithm on the CEC 2015 benchmark functions and uncapacitated facility location problems [6]. Hussein et al. proposed an adaptation of the original whale optimization algorithm to deal with binary optimization problems [7]. Çınar and Kıran presented a new tree seed algorithm for binary

optimization problems developed using logic gates and similarity measurement techniques. [8]. Rizk-Allah et al. proposed a novel binary version of the salp swarm algorithm based on a developed arctan transform so that the salp swarm algorithm can be adapted to binary problems [9]. Arora and Anand developed a binary variant of the butterfly optimization algorithm and used it to select feature subsets for classification [10]. Mafarja et al. proposed a binary dragonfly-based wrapper-feature selection algorithm. The algorithm was tested with eighteen benchmark datasets and eight different transfer functions mapping the continuous search space to the discrete search space [11]. Akan et al. presented a binary variant of the battle royale optimization algorithm [12]. Abdel-Basset et al. introduced a binary version of the marine predator optimization algorithm using a wide variety of transfer functions to map continuous values to binary [13]. Kaya proposed the binary galactic swarm optimization algorithm, which employs the binary artificial algae algorithm as the primary search algorithm [14]. Chauhan and Yadav designed a new binary variant of the artificial electric field algorithm to enhance its performance in discrete problems [15]. Şahman and Çınar mapped the tree seed algorithm to binary search space with the help of transfer functions to solve binary optimization problems. The proposed algorithm was used to solve the uncapacitated facility location problems for different sizes [16]. Dehghani et al. proposed the Binary Spring Search Algorithm based on the simulation of Hooke's Law (physics) for the conventional system of weights and springs to solve binary problems. The performance of the proposed algorithm was extensively validated for functions with unimodal and multimodal features [17]. Beheshti proposed the x-shaped binary PSO algorithm using a new x-shaped transfer function to enhance the exploration and exploitation capabilities of binary PSO in binary search space. The proposed algorithm was run on the 0–1 multidimensional knapsack problems, maximization functions, and minimization functions [18]. Kalra et al. presented the binary Emperor Penguin Optimizer algorithm for efficient solution of binary nature problems, leveraging the power of the standard Emperor Penguin Optimizer. The performance of the algorithm is evaluated over twenty-nine benchmark functions and binary feature selection problem [19]. Chantar et al. proposed an advanced binary grey wolf optimizer within a wrapper feature selection approach for solving Arabic text classification problems. The binary grey wolf optimizer was used in this algorithm as a wrapper-based method of feature selection [20]. Nadimi-Shahraki et al. presented a wrapper feature selection approach based on the Aquila optimizer. The proposed S-shaped binary Aquila optimizer and V-shaped binary Aquila optimizer were used for feature selection in medical datasets and real COVID-19 datasets [21]. He et al. proposed a new binary differential evolution algorithm based on taper-shaped transfer functions. The algorithm was used to solve the knapsack problem and the uncapacity facility location problem [22]. Hakli proposed a new binary algorithm based on the elephant herding optimization algorithm in order to develop a powerful algorithm that can deal with binary problems. The proposed method was applied to the problems of 0-1 knapsack, uncapacitated facility location, and wind turbine placement [23]. Pourrajabian et al. investigated the robustness and accuracy of the continuous and binary genetic algorithm approaches for the wind turbine blade design problem [24]. Mohammadzadeh and Gharehchopogh presented three efficient binary methods based on the Symbiotic Organism Search algorithm to solve the feature selection problem. In these methods, the S-shaped transfer function, the V-shaped transfer function, and two new operators named binary mutualism and binary commensalism were used to make the algorithm binary. The proposed methods were tested on the standard UCI dataset and on the spam e-mail dataset [25]. Ghosh et al. proposed a new feature selection approach based on the Manta ray foraging optimization algorithm, which models the foraging behavior of manta rays [26]. Feng and Wang proposed a self-learning-based binary moth search algorithm for solving multidimensional knapsack problems [27]. Xi et al. proposed the binary African Vulture Optimization Algorithm to solve discrete optimization problems. This algorithm uses the X-shaped transfer function. The algorithm was tested on benchmark problems, engineering problems, and the uncapacitated facility location problem [28].

The performances of binary optimization algorithms proposed in the literature are also frequently investigated when optimizing continuous functions [29-31]. Evolutionary computing or swarm intelligence algorithms can be used to optimize functions with continuous decision variables. However,

because the problem can be generalized as desired and the optimum solutions are known, comparing binary optimization methods with each other on these problems is simple and informative. Therefore, most researchers also test the performance of binary optimization algorithms on such continuous functions [32]. With this motivation, in this study, the manta ray search optimization algorithm was discretized to be used in the solution of binary problems, and the binary version of the algorithm was proposed. The proposed Bin_MRFOA algorithm was tested on continuous problems such as CEC2005 and classical benchmark functions. The remaining of this paper is organized as follows: The material and method are detailed in Section 2. Experimental results obtained from Bin_MRFOA on classical and CEC2005 benchmark functions are shown in Section 3. The discussion and conclusions about Bin_MRFOA are presented in Section 4.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Manta Ray Foraging Optimization Algorithm (MRFOA)

Manta rays are organisms that feed on plankton, which is a type of aquatic microfauna. They use the angular heads of their mouths to absorb water and prey during feeding and have upgraded rabbles to filter their prey out of the water. Manta rays are creatures that work in an organized way to find the best food. The manta ray foraging optimization algorithm was created based on the manta rays' mentioned features. This algorithm, proposed by Zhao et al. in 2020, mimics three different search strategies: chain, cyclone, and tumble foraging [33].

MRFOA, like many meta-heuristic algorithms, the initialization step is randomly created as given in Equation 1.

$$X_i^d = Lb_i^d + rand * (Ub_i^d - Lb_i^d) \quad i = 1, \dots, N \quad d = 1, \dots, D \quad (1)$$

where D is the number of dimensions, N is the population size, and Lb and Ub are the lower and upper limits for the dimensions.

2.1.1. Chain foraging

In MRFOA, manta rays can detect a plankton's position and swim towards it. The higher the plankton density in a location, the better the location, and manta rays are thought to tend to be directed towards high-density areas. Manta rays form a foraging chain by aligning themselves from head to tail for this reason. With the exception of the first individual, they have a tendency to look both at the food and at the individual in front of them. Each individual is updated after each iteration using both the solution that came before it and the best solution thus far. The mathematical model of chain foraging is expressed as given in Equation 2.

$$X_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} X_{best,t}^t + r * (X_{best,d}^t - X_{i,d}^t) + \alpha * (X_{best,d}^t - X_{i,d}^t) & i = 1 \\ X_{i-1,d}^t + r * (X_{i-1,d}^t - X_{i,d}^t) + \alpha * (X_{best,d}^t - X_{i,d}^t) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha = 2 * r * \sqrt{|\log(r)|} \quad (3)$$

In Equation 2, r is a vector consisting of random numbers in the interval $[0,1]$, α is the weight coefficient given in Equation 3, $X_{i,d}^t$ is the position of the i th individual at time t of the d th dimension, and $X_{best,d}^t$ is the high-density best location.

2.1.2. Cyclone foraging

When a swarm of manta rays spots a piece of plankton in deep water, in addition to spiraling toward the piece of plankton, each manta ray swims towards the one in front of it. In other words, swarms of manta rays move in a spiral and line up. The mathematical model of the aforementioned cyclone foraging is as given in Equation 4.

$$X_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} X_{best,d}^t + r * (X_{best,d}^t - X_{i,d}^t) + \beta * (X_{best,d}^t - X_{i,d}^t) & i = 1 \\ X_{best}^d(t) + r * (X_{i-1,d}^t - X_{i,d}^t) + \beta * (X_{best,d}^t - X_{i,d}^t) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = 2e^{r1 \frac{T-t+1}{T}} * \sin(2\pi r1) \quad (5)$$

where β is the weight coefficient given in Equation 5, T denotes the maximum number of iterations, and r1 is a random number between 0 and 1.

Furthermore, to improve population search and exploration capabilities, MRFOA generates a new location at random during the optimization process and then makes a spiral search at that location. As a result, MRFOA conducts a comprehensive global search, and its mathematical model is shown in Equation 7.

$$X_{r,d}^t = Lb^d + r * (Ub^d - Lb^d) \quad (6)$$

$$X_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} X_{r,d}^t + r * (X_{r,d}^t - X_{i,d}^t) + \beta * (X_{r,d}^t - X_{i,d}^t) & i = 1 \\ X_{r,d}^t + r * (X_{i-1,d}^t - X_{i,d}^t) + \beta * (X_{r,d}^t - X_{i,d}^t) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

where $X_{r,d}^t$ represents a random location in the search space(Equation 6), Lb^d and Ub^d are the lower and upper limit values for the d th dimension, respectively.

2.1.3. Somersault foraging

Each individual swims back and forth around a food location viewed as a pivot and somersaults to a new position in this strategy. As a result, individuals update their location based on the best location found thus far. Equation 8 is used to create a mathematical model of this behavior.

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{i,d}^t + S * (r2 * X_{best,d}^t - r3 * X_{i,d}^t), \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

In the Equation, r2 and r3 are two random numbers in the interval [0, 1]. S is a somersault factor, which determines the somersault distance.

The pseudocode of MRFOA is given in Figure 1.

```

1. Determine  $T_{max}, N, Ub, Lb, t = 1$ 
2. Initialize population according to Equation 1.
3. Compute the fitness of each individual  $f(X_i)$ 
4. Obtain best individual ( $X_{best}$ )
5. While stop criterion is not satisfied do
6.   For  $i=1$  to  $N$ 
7.     If  $rand < 0.5$  then // Cyclone foraging
8.       If  $t / T_{max} < rand$  then
9.         Generate a random individual( $X_r(t)$ ) according to Equation 6.
10.        Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 7.
11.       Else
12.         Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 4.
13.       End If
14.     Else //Chain foraging
15.       Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 2.
16.     End If
17.   Compute the fitness of each individual  $f(X_i(t + 1))$ 
18.   If  $f(X_i(t + 1)) < f(X_{best})$  then
19.      $f(X_{best}) = f(X_i(t + 1))$ 
20.   End If
21. End For
22. For  $i=1$  to  $N$  //Somersault foraging
23.   Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 8.
24.   Compute the fitness of the individual  $f(X_i(t + 1))$ 
25.   If  $f(X_i(t + 1)) < f(X_{best})$  then
26.      $f(X_{best}) = f(X_i(t + 1))$ 
27.   End If
28. End For
29. End While

```

Figure 1. Pseudocode of MRFOA

2.2. Binary Manta Ray Foraging Optimization Algorithm (Bin_MRFOA)

The manta ray search optimization algorithm is a swarm intelligence-based algorithm proposed for continuous optimization, with advantages such as strong global search capability, few parameters to adjust, and robustness [34]. The objective of this study is to present a binary MRFOA for solving continuous optimization tasks. MRFOA was chosen for this study because it is a new heuristic algorithm and binary MRFOA studies are rare in the literature. Initially, a manta ray population of N individuals is created. Each manta ray has n dimensions created with binary values generated using Equation 9. It randomly generates 0 or 1 for each i th position of each manta ray (X_i). The d th dimension is given a value of 1 if a random number in the range of (0,1) is greater than 0.5, otherwise a value of 0.

$$X_i^d = \begin{cases} 1 & \text{if } rand(0,1) > 0.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

The decision variables of the comparison functions used in this study take continuous values. For this reason, in the proposed Bin_MRFOA, binary values are converted to continuous values to solve these problems and calculate the fitness values of each individual. This conversion is done according to the equation given in Equation 10.

$$C_j = Low_j + \frac{(High_j - Low_j) DecValue_j}{MaxValue} \quad (10)$$

In Equation 10, while C_j denotes the continuous value of the j th dimension of the individual, and $High_j$ and Low_j denote the upper and lower bound values of the j th dimension. $DecValue_j$ indicates the integer value in the decimal number system of the binary number in the j th dimension. $MaxValue$

represents the maximum decimal integer value that the binary number can take, according to the bit length determined for each dimension [32]. For example, assuming that the binary values are represented by 4 bits, the binary value in the *j*th dimension is "1110" and the continuous value of the dimension is in the range of [-2, +2], the continuous value conversion is calculated as follows:

$$C_j = -2 + \frac{(2 - (-2)) \times 14}{2^4 - 1} = -2 + \frac{56}{15} = 1.73$$

The transfer function is the most important aspect of binary optimization. Eight different transfer functions are used in this study to map MRFOA's continuous search space to the binary search space. Transfer functions use a real value as input and normalize it to a value between 0 and 1 using one of the equations in Table 1 [35-37]. Equation 11 is used to convert this number between 0 and 1 to a binary value.

$$F(a) = \begin{cases} 1 & \text{if } F(a) > rand(0,1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{11}$$

Table 1. Transfer functions

V-Shaped		S-Shaped	
V1	$F(a) = \left \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2} a\right) \right $	S1	$F(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}}$
V2	$F(a) = \tanh(a) $	S2	$F(a) = \frac{1}{1 + e^{-2*a}}$
V3	$F(a) = \left \frac{a}{\sqrt{1 + a^2}} \right $	S3	$F(a) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{a}{2}}}$
V4	$F(a) = \left \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} a\right) \right $	S4	$F(a) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{a}{3}}}$

Binary solution space is well suited for logic gates with binary input and output values. Exclusive-or (Xor) gate is often used in logic circuits. According to the truth table given in Table 2, the probability of the output being 0 or 1 in the Xor gate (\oplus) is equal. Because of this feature, it supports diversity and is frequently used in the literature[6, 8]. In this study, the Xor gate was employed according to the formula given in Equation 12 for candidate solution(CX_i) generation.

$$CX_i^d = X_i^d \oplus X_{best}^d \tag{12}$$

Table 2. Xor truth table

X_i^d	X_k^d	$X_i^d \oplus X_k^d$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0
50%=0		50%=1

The pseudo-code of Bin_MRFOA is shown in Figure 2.

```

1. Determine  $T_{max}$ ,  $N$ ,  $Ub$ ,  $Lb$ ,  $t = 1$ 
2. Initialize population according to Equation 9.
3. Convert binary values to continuous values according to Equation 10.
4. Compute the fitness value  $f(X_i)$  of each individual in the population.
5. Obtain best individual ( $X_{best}$ )
6. While stop criterion is not satisfied do
7.   For  $i=1$  to  $N$ 
8.     If  $rand < 0.5$  then // Cyclone foraging
9.       If  $t / T_{max} < rand$  then
10.        Generate a random individual( $X_r(t)$ ) according to Equation 6.
11.        Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 7.
12.       Else
13.        Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 4.
14.       End If
15.     Else //Chain foraging
16.       Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 2.
17.     End If
18.     Convert  $X_i(t + 1)$  to binary form with the help of selected transfer functions.
19.     Generate candidate solution using XOR gate according to Equation 12.
20.     Convert binary values to continuous values according to Equation 10.
21.     Compute the fitness of candidate individual  $f(X_i(t + 1))$ 
22.     If  $f(X_i(t + 1)) < f(X_{best})$  then
23.        $f(X_{best}) = f(X_i(t + 1))$ 
24.     End If
25.   End For
26.   For  $i=1$  to  $N$  //Somersault foraging
27.     Create a new candidate individual ( $X_i(t + 1)$ ) according to Equation 8.
28.     Convert  $X_i(t + 1)$  to binary form with the help of selected transfer functions.
29.     Generate candidate solution using XOR gate according to Equation 12.
30.     Convert binary values to continuous values according to Equation 10.
31.     Compute the fitness of the candidate individual  $f(X_i(t + 1))$ 
32.     If  $f(X_i(t + 1)) < f(X_{best})$  then
33.        $f(X_{best}) = f(X_i(t + 1))$ 
34.     End If
35.   End For
36. End While

```

Figure 2. Pseudocode of Bin_MRFOA

3. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, the performance of the proposed Bin_MRFOA on the classical and CEC2005 benchmark functions is examined. Classical functions have been used to determine the ideal population size and the best performing transfer function for the algorithm, and these functions and their properties are given in Table 3. The classical functions used in the testing process consist of a total of ten functions, three of which are multimodal and seven of which are unimodal. For classical functions, the maximum iteration is 500, and the dimension is 10. Each function was run independently 30 times and the mean and standard deviation values of the obtained results were found.

Firstly, the proposed algorithm was run for five different population size (N) values to determine the effect of population size selection on performance. During this test, sigmoid (S1) was used as the transfer function, and the results are given in Table 4. The best mean value obtained for each function was shown in bold in the table. When the results were examined, it was seen that the best mean values for the functions could not be obtained from a single population size value and varied for each function. Therefore, the results obtained for different population values were evaluated statistically, and the Friedman test was applied, which enables sorting between the groups by comparing the mean in cases where the assumption of normality between the dependent groups is not provided [38-40]. The mean rank values obtained as a result of this test, which was applied separately for mean and standard deviation values, are presented comparatively in the graphic in Figure 3. According to the graphic, the

smallest mean rank values in both comparisons were obtained when the population size was 50. Based on this result, the population size was taken as 50 in the tests that will be mentioned in the following sections.

Table 3. Classic benchmark functions

Function	Range	f_{min}	Characteristic
$F1(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2$	[-100,100]	0	T
$F2(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2 + \prod_{i=1}^d x_i $	[-10,10]	0	T
$F3(x) = \sum_{i=1}^d (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	[-100,100]	0	T
$F4(x) = \max_i\{ x_i , 1 \leq i \leq d\}$	[-100,100]	0	T
$F5(x) = \sum_{i=1}^{d-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	[-30,30]	0	T
$F6(x) = \sum_{i=1}^d ([x_i + 0.5])^2$	[-100,100]	0	T
$F7(x) = \sum_{i=1}^d i * x_i^4 + rand[0,1)$	[-1.28,1.28]	0	T
$F8 = \sum_{i=1}^d -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	[-500,500]	-418.9829 × d	Ç
$F9 = \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	[-5.12,5.12]	0	Ç
$F10(x) = \sum_{i=1}^d -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	[-32,32]	0	Ç

Table 4. Comparative results for various population sizes (N)

Function	N=10		N=20		N=30		N=40		N=50	
	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
F1	4,401E+03	1,348E+03	4,021E+03	1,280E+03	4,024E+03	1,140E+03	4,452E+03	9,856E+02	4,444E+03	8,892E+02
F2	1,549E+01	2,941E+00	1,665E+01	2,314E+00	1,702E+01	1,912E+00	1,739E+01	2,540E+00	1,697E+01	2,742E+00
F3	4,383E+03	1,285E+03	4,283E+03	1,229E+03	4,422E+03	8,495E+02	4,681E+03	7,793E+02	4,349E+03	9,205E+02
F4	3,580E+01	4,858E+00	3,629E+01	3,860E+00	3,540E+01	4,774E+00	3,495E+01	3,680E+00	3,461E+01	4,408E+00
F5	1,460E+06	8,290E+05	1,838E+06	9,119E+05	1,980E+06	1,034E+06	1,984E+06	9,700E+05	1,746E+06	6,008E+05
F6	3,486E+03	1,131E+03	4,211E+03	9,086E+02	3,823E+03	1,094E+03	4,113E+03	9,859E+02	4,181E+03	9,194E+02
F7	8,553E-01	2,245E-01	7,979E-01	2,417E-01	9,486E-01	2,829E-01	9,494E-01	3,419E-01	8,522E-01	3,202E-01
F8	-2,396E+03	1,552E+02	-2,400E+03	1,459E+02	-2,447E+03	1,580E+02	-2,452E+03	1,832E+02	-2,441E+03	1,532E+02
F9	6,819E+01	5,556E+00	6,860E+01	6,843E+00	6,580E+01	6,651E+00	6,622E+01	8,105E+00	6,290E+01	9,100E+00
F10	1,628E+01	7,251E-01	1,625E+01	6,321E-01	1,652E+01	6,671E-01	1,576E+01	1,199E+00	1,649E+01	6,230E-01

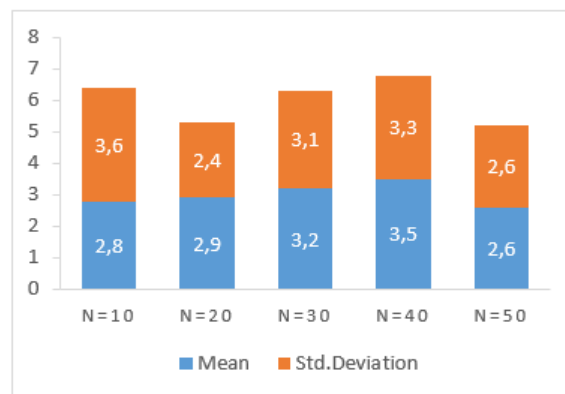


Figure 3. Comparison of Friedman test mean rank values

After determining the ideal population size, variants of the proposed algorithm were created using eight different transfer functions to determine the effect of the selected transfer function on performance and to determine the most successful transfer function. Comparison results of Bin_MRFOA variants are given in Table 5. When the results in the table were examined, it was found that the variant obtained with the V2 transfer function in four of the functions and the variant obtained with the V4 transfer function in the remaining six functions achieved a more successful mean value. It was determined that the best values were found by the variants created with the V2 and V4 transfer functions, except for the F9 function. The sums of the mean and standard deviation values acquired by Bin_MRFOA variants for all functions are compared in the graphics given in Figure 4 and Figure 5, respectively. According to the graphics, it was seen that the smallest sum values were generally obtained by variants created using V-shaped transfer functions, and the lowest sum values were found from the V4 variant in both graphics.

Table 5. Bin_MRFOA variants' statistical results on classical benchmark functions

	Transfer Func	Best	Median	Worst	Mean	Std
F1	S1	2.969E+03	4.533E+03	5.794E+03	4.562E+03	7.734E+02
	S2	2.354E+03	3.597E+03	6.206E+03	3.928E+03	1.035E+03
	S3	2.617E+03	4.399E+03	6.477E+03	4.447E+03	8.707E+02
	S4	2.093E+03	4.677E+03	5.843E+03	4.431E+03	1.130E+03
	V1	9.775E+00	1.399E+02	1.806E+03	2.427E+02	4.058E+02
	V2	7.270E-26	6.828E+01	6.513E+02	1.334E+02	1.681E+02
	V3	1.852E+03	3.540E+03	5.073E+03	3.376E+03	9.564E+02
	V4	9.241E-01	2.215E+01	1.657E+03	2.179E+02	4.473E+02
F2	S1	6.752E+00	1.611E+01	2.096E+01	1.608E+01	3.000E+00
	S2	1.344E+01	1.632E+01	1.916E+01	1.629E+01	1.735E+00
	S3	1.382E+01	1.711E+01	2.146E+01	1.751E+01	1.903E+00
	S4	1.067E+01	1.635E+01	2.023E+01	1.664E+01	2.310E+00
	V1	8.882E-14	1.206E+00	5.054E+00	1.426E+00	1.336E+00
	V2	8.457E-11	3.340E-01	6.987E+00	7.399E-01	1.512E+00
	V3	5.727E+00	1.144E+01	1.572E+01	1.168E+01	2.577E+00
	V4	8.882E-14	1.675E-01	4.445E+00	5.390E-01	1.110E+00
F3	S1	1.008E+03	4.385E+03	5.538E+03	4.083E+03	1.253E+03
	S2	3.046E+03	4.907E+03	5.974E+03	4.698E+03	7.693E+02
	S3	1.987E+03	4.903E+03	6.813E+03	4.676E+03	1.031E+03
	S4	2.013E+03	4.287E+03	5.970E+03	4.250E+03	1.067E+03
	V1	1.639E+02	1.464E+03	5.440E+03	1.739E+03	1.313E+03

	V2	2.911E-07	1.115E+03	3.749E+03	1.325E+03	1.151E+03
	V3	2.377E+03	4.697E+03	5.376E+03	4.386E+03	8.376E+02
	V4	1.424E+02	9.446E+02	3.131E+03	1.166E+03	8.025E+02
F4	S1	3.014E+01	3.604E+01	4.276E+01	3.605E+01	2.932E+00
	S2	2.754E+01	3.705E+01	4.528E+01	3.647E+01	4.456E+00
	S3	2.145E+01	3.519E+01	4.335E+01	3.537E+01	4.344E+00
	S4	2.761E+01	3.258E+01	4.320E+01	3.358E+01	4.561E+00
	V1	6.941E+00	1.866E+01	3.542E+01	2.005E+01	7.507E+00
	V2	3.308E+00	1.689E+01	3.056E+01	1.617E+01	8.693E+00
	V3	2.283E+01	3.393E+01	4.037E+01	3.368E+01	4.874E+00
	V4	2.700E-13	7.975E+00	2.334E+01	9.261E+00	6.448E+00
F5	S1	5.922E+05	1.712E+06	3.646E+06	1.888E+06	1.008E+06
	S2	3.061E+05	1.535E+06	4.363E+06	1.781E+06	9.780E+05
	S3	3.065E+05	1.775E+06	3.322E+06	1.692E+06	8.229E+05
	S4	6.667E+05	2.071E+06	4.906E+06	2.050E+06	1.079E+06
	V1	2.234E+03	5.772E+04	2.308E+06	2.275E+05	5.277E+05
	V2	4.984E+02	5.693E+03	2.375E+06	1.325E+05	5.283E+05
	V3	3.888E+05	1.158E+06	2.423E+06	1.281E+06	6.055E+05
	V4	2.501E+01	1.028E+03	7.733E+04	5.041E+03	1.709E+04
F6	S1	1.678E+03	4.209E+03	6.106E+03	4.292E+03	1.165E+03
	S2	2.797E+03	4.369E+03	6.474E+03	4.372E+03	1.006E+03
	S3	2.229E+03	4.513E+03	5.339E+03	4.234E+03	8.727E+02
	S4	2.903E+03	4.097E+03	5.547E+03	4.194E+03	7.752E+02
	V1	4.218E+00	1.413E+02	1.718E+03	2.693E+02	4.013E+02
	V2	1.827E+00	1.960E+01	9.749E+02	1.095E+02	2.338E+02
	V3	8.050E+02	3.311E+03	5.322E+03	3.428E+03	1.132E+03
	V4	1.304E+00	5.812E+01	1.722E+03	1.780E+02	3.852E+02
F7	S1	3.066E-01	9.120E-01	1.445E+00	9.333E-01	3.088E-01
	S2	3.964E-01	8.927E-01	1.351E+00	8.764E-01	2.748E-01
	S3	4.031E-01	7.404E-01	1.283E+00	8.074E-01	2.573E-01
	S4	3.377E-01	9.161E-01	1.299E+00	8.687E-01	2.453E-01
	V1	2.571E-02	8.980E-02	5.158E-01	1.391E-01	1.431E-01
	V2	3.431E-04	6.138E-02	2.537E-01	8.173E-02	6.613E-02
	V3	3.054E-01	6.883E-01	1.016E+00	6.939E-01	1.998E-01
	V4	1.113E-02	3.975E-02	4.447E-01	6.540E-02	9.410E-02
F8	S1	-2.682E+03	-2.412E+03	-2.186E+03	-2.408E+03	1.330E+02
	S2	-2.896E+03	-2.551E+03	-2.276E+03	-2.559E+03	1.737E+02
	S3	-2.741E+03	-2.396E+03	-2.143E+03	-2.424E+03	1.732E+02
	S4	-2.928E+03	-2.424E+03	-2.189E+03	-2.430E+03	1.957E+02
	V1	-4.027E+03	-3.856E+03	-3.392E+03	-3.825E+03	1.616E+02
	V2	-4.123E+03	-4.058E+03	-3.566E+03	-3.982E+03	1.566E+02
	V3	-3.722E+03	-3.347E+03	-2.721E+03	-3.317E+03	2.612E+02
	V4	-4.160E+03	-3.973E+03	-3.393E+03	-3.949E+03	1.968E+02
F9	S1	3.318E+01	6.580E+01	7.638E+01	6.370E+01	9.759E+00
	S2	4.597E+01	6.758E+01	7.579E+01	6.347E+01	8.716E+00
	S3	4.286E+01	6.738E+01	8.201E+01	6.502E+01	1.029E+01
	S4	5.693E+01	6.790E+01	7.685E+01	6.767E+01	5.344E+00

	V1	4.690E-12	2.245E+01	5.457E+01	2.484E+01	1.403E+01
	V2	2.472E+00	7.367E+00	2.246E+01	1.010E+01	6.485E+00
	V3	3.841E+01	5.726E+01	7.189E+01	5.738E+01	8.095E+00
	V4	4.079E-01	8.802E+00	4.062E+01	1.112E+01	9.420E+00
F10	S1	1.352E+01	1.657E+01	1.729E+01	1.624E+01	9.814E-01
	S2	1.180E+01	1.606E+01	1.711E+01	1.588E+01	1.198E+00
	S3	1.306E+01	1.630E+01	1.722E+01	1.591E+01	1.309E+00
	S4	1.388E+01	1.651E+01	1.753E+01	1.636E+01	8.847E-01
	V1	3.265E+00	5.826E+00	1.170E+01	6.343E+00	2.544E+00
	V2	1.429E+00	3.956E+00	9.940E+00	4.210E+00	2.015E+00
	V3	1.102E+01	1.474E+01	1.650E+01	1.428E+01	1.551E+00
	V4	2.080E-01	3.177E+00	9.385E+00	3.864E+00	2.468E+00

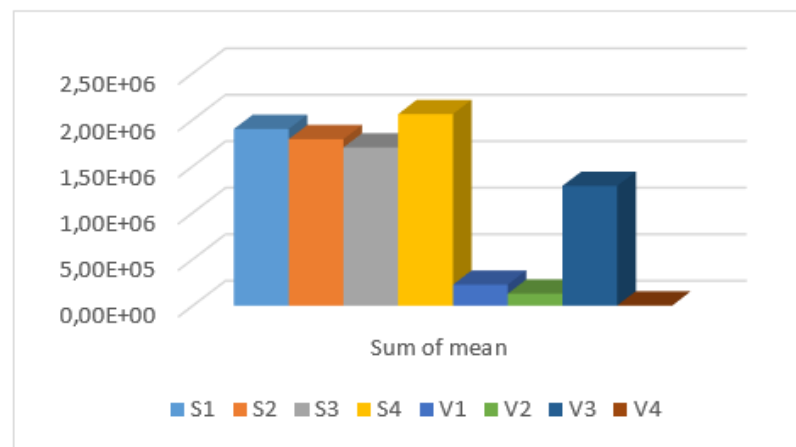


Figure 4. Comparison of the sum of the mean results

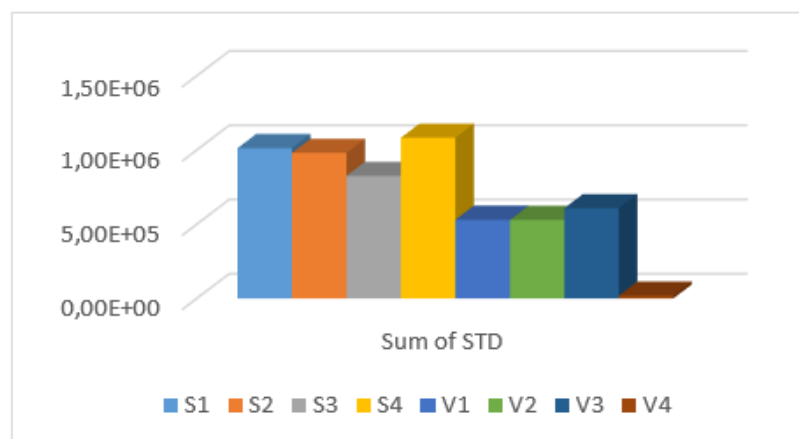
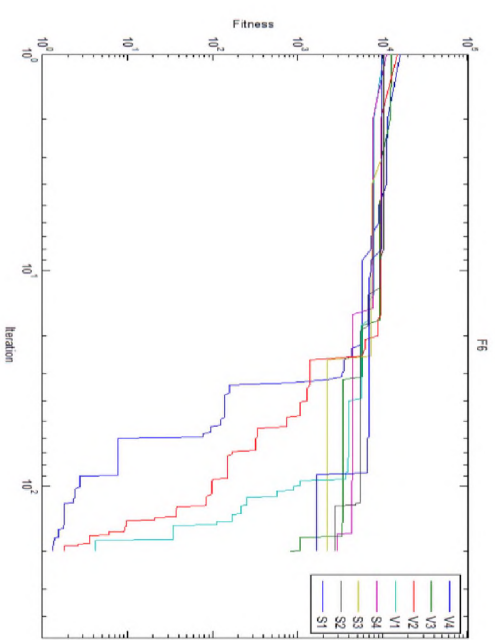
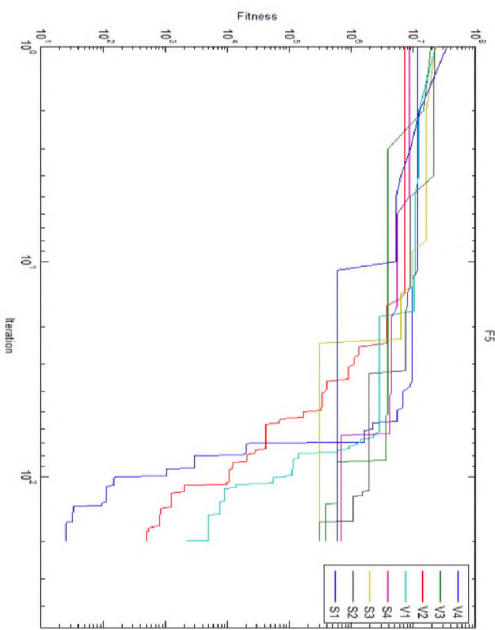
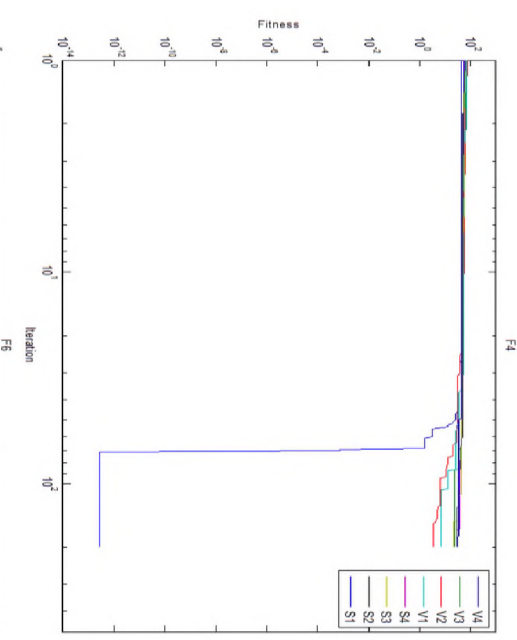
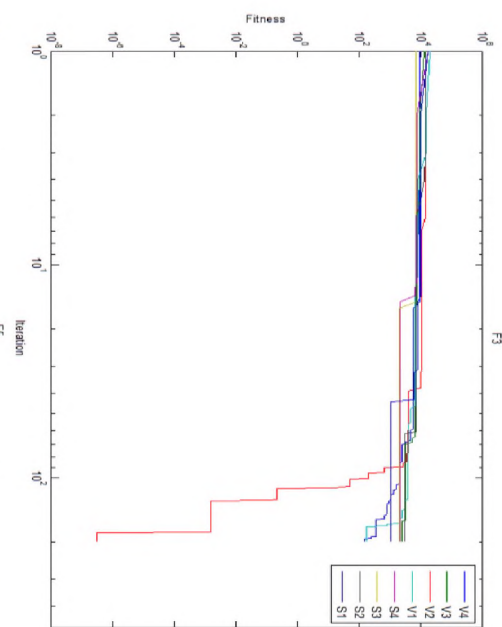
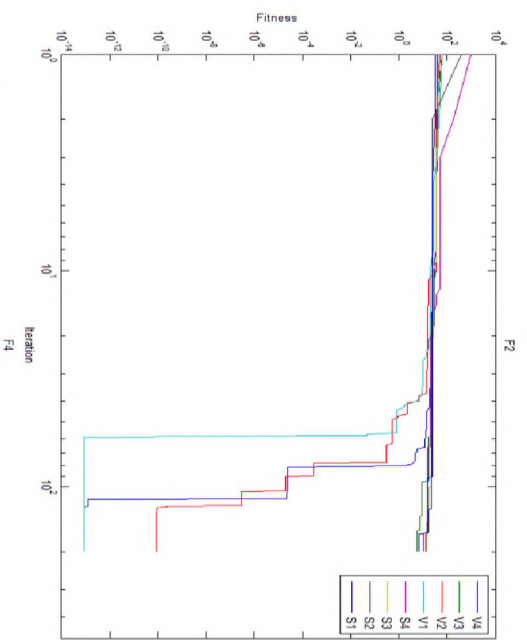
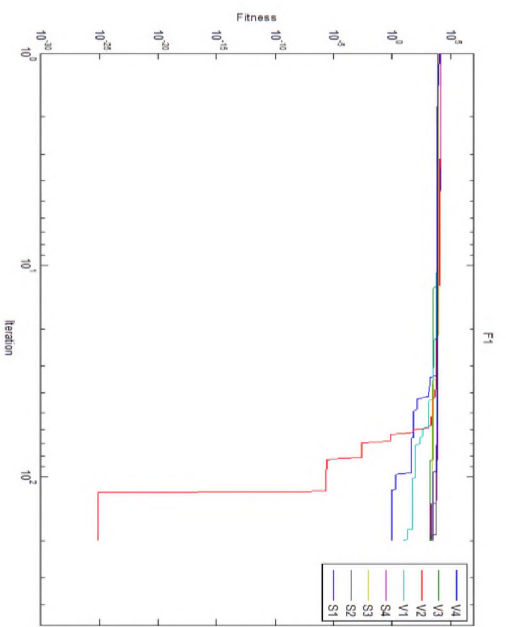


Figure 5. Comparison of the sum of the standard deviation results

In addition, the convergence graphics obtained from the variants for each function and plotted according to the best value are presented in Figure 6. When the graphics are examined, the V2 variant in the F1, F3, and F7 functions, the V4 variant in the F4, F5, F6, F8, and F10 functions, and the V1 variant in the remaining F2 and F9 functions converged faster and found the best value. In light of these results, it can be said that the variants using the transfer function with a V-shaped converge faster than the other variants.



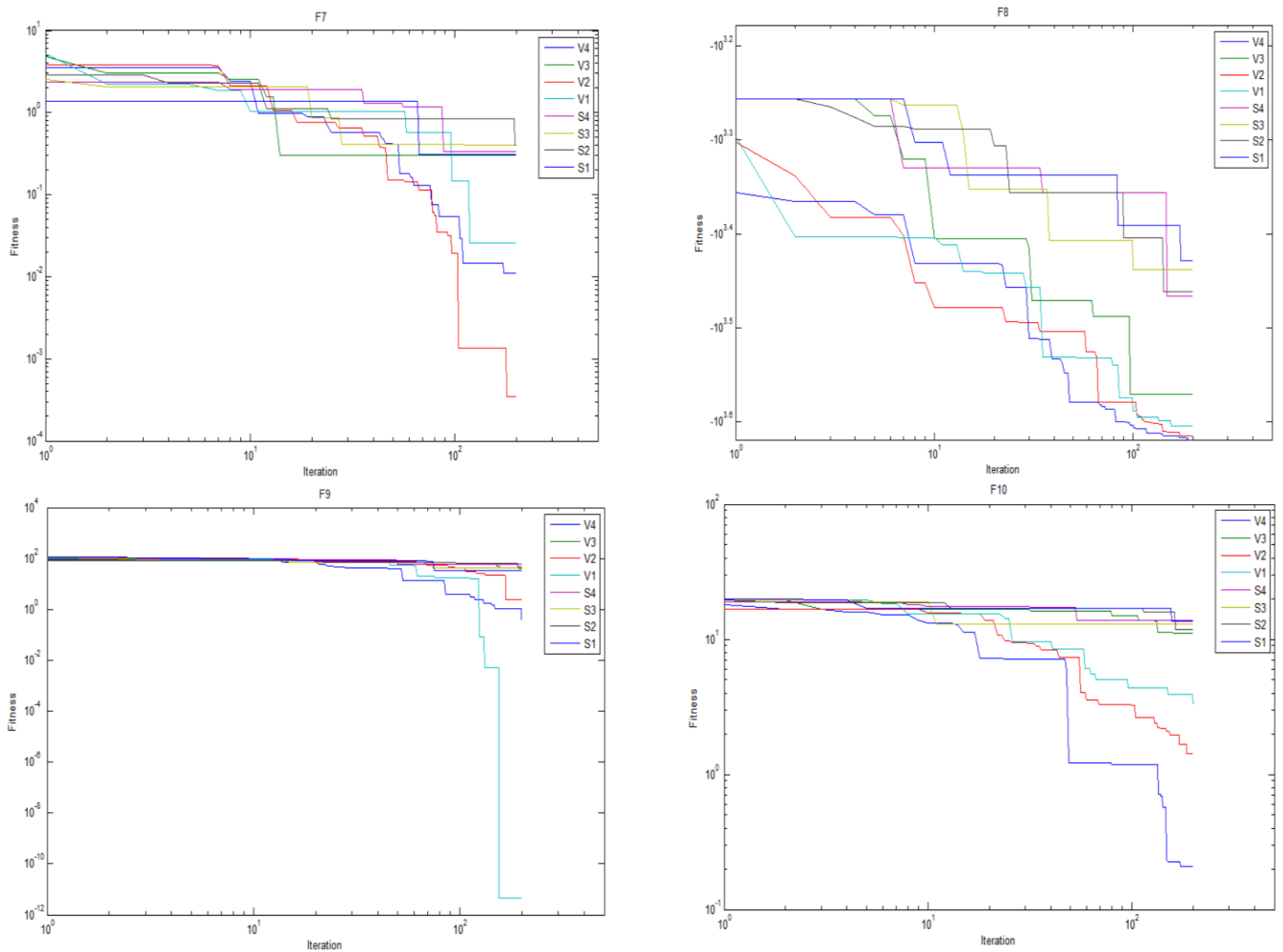


Figure 6. Convergence graphics for the variants on classic benchmark functions

After the performance evaluation of Bin_MRFOA on the classical benchmark functions, the algorithm was run on the CEC2005 benchmark functions. The findings were compared with the algorithms in the literature. The properties of the CEC2005 benchmark functions used are given in Table 6. To make a fair comparison, the algorithms were run under the same conditions as the compared algorithms. According to this, parameter settings are as follows: the population size (N) is set to 40, and the maximum iteration number as the stopping criterion is set to 500. All of binary algorithms are independently run 50 times. The dimensions of functions F1-F14 are 5, while hybrid composition functions F15-F18 are 10. In addition, the Bin_MRFOA variant obtained by using the V4 transfer function, which was found to be more successful in the previous section, was used for literature comparison.

Table 6. CEC2005 benchmark functions

Function	Name	Bound	f_{\min}
Unimodal Functions			
F1	Shifted Sphere Function	[-100, 100]	-450
F2	Shifted Schwefel's Problem 1.2	[-100, 100]	-450
F3	Shifted Rotated High Conditioned Elliptic Function	[-100, 100]	-450
F4	Shifted Schwefel's Problem 1.2 with Noise in Fitness	[-100, 100]	-450
F5	Schwefel's Problem 2.6 with Global Optimum on Bounds	[-100, 100]	-310
Multimodal functions			
F6	Shifted Rosenbrock's Function	[-100, 100]	390
F7	Shifted Rotated Griewank's Function without Bounds	[0, 600]	-180
F8	Shifted Rotated Ackley's Function with Global Optimum on Bounds	[-32, 32]	-140
F9	Shifted Rastrigin's Function	[-5, 5]	-330
F10	Shifted Rotated Rastrigin's Function	[-5, 5]	-330
F11	Shifted Rotated Weierstrass Function	[-0.5, 0.5]	90
F12	Schwefel's Problem 2.13	$[-\lambda, \lambda]$	-460
Expanded functions			
F13	Expanded Extended Griewank's plus Rosenbrock's Function (F8F2)	[-3, 1]	-130
F14	Expanded Rotated Extended Scaffe's F6	[-100, 100]	-300
Hybrid composition functions			
F15	Hybrid Composition Function 1	[-5, 5]	120
F16	Rotated Hybrid Composition Function 1	[-5, 5]	120
F17	Rotated Hybrid Composition Function 1 with Noise in Fitness	[-5, 5]	120
F18	Rotated Hybrid Composition Function 2	[-5, 5]	10

In the literature comparison, the Bin_MRFOA was compared to the findings of the algorithms mentioned in the studies of Beheshti [41] and Baş [42]. Comparison results are showed in Table 7. According to Table 7, Bin_MRFOA found a more successful mean value in 10 of the 18 functions. Similarly, 12 of the 18 functions obtained a better standard deviation value. Pairwise comparisons of the algorithms were made using the Wilcoxon signed-rank test. The Wilcoxon signed-rank test gets to decide the difference between two samples and offers an alternate position test influenced by the amplitude and sign of these differences. This test is also used to decide whether one algorithm outperforms another [40, 43]. The symbols +, -, and \approx show the number of test functions in which the Bin_MRFOA is better, worse, and equal than the other algorithm, respectively. The significance level of the Wilcoxon signed-rank test was set at 0.05. Accordingly, since the obtained p value was less than 0.05, it was determined that there was a significant difference between the Bin_MRFOA and BPSO algorithms. In other words, the Bin_MRFOA algorithm outperformed BPSO. Since the p value of the remaining algorithms was greater than 0.05, there was no significant difference between them and Bin_MRFOA. The algorithms had similar performances. In addition, in the ranking among algorithms based on the Friedman test, the Bin_MRFOA algorithm took second place with a mean rank of 2,61. According to this result, it can be said that the proposed algorithm is a successful and competitive algorithm compared to the literature.

Table 7. The comparison results of Bin_MRFOA and algorithms in the literature on CEC2005 benchmark functions

Function		TVMS-BPSO [41]	MS-BPSO [41]	TV-BPSO [41]	BPSO [41]	BinSSA4 [42]	Bin_MRFOA
F1	Mean	-446.97	-420.73	-446.1	-432.56	-431.45	-450.00
	Std	5.4981	60.906	5.9235	16.237	8.412	0.00
F2	Mean	-438.98	-395.92	-436.31	-421.95	-435.47	-450.00
	Std	17.377	181.1	22.081	24.169	21.452	0.00
F3	Mean	98.287	3.47E+05	1.05E+05	2.98E+05	98.265	1.95E+05
	Std	1.13E+05	3.68E+05	1.11E+05	2.59E+05	1.02E+05	3.35E+05
F4	Mean	-441.74	-406.59	-433.73	-409.16	-445.45	-450.00
	Std	12.37	56.808	25.236	31.834	13.42	0.00
F5	Mean	-241.97	-225.78	-127.65	-4.5091	-125.41	-310.00
	Std	106.14	694.32	270.05	106.95	220.41	0.00
F6	Mean	503.45	10.293	1625	4926.8	2412.4	390.00
	Std	146.36	22.647	7752.8	9628.2	4124.5	0.00
F7	Mean	266.25	266.66	266.43	269.87	266.55	220.20
	Std	265.9	265.95	266.04	267.37	274.14	182.71
F8	Mean	-120.05	-120.01	-120.24	-120.05	-120.05	-120.06
	Std	0.74112	0.31108	1.7162	0.62672	0.7452	0.50
F9	Mean	-328.55	-328.03	-328.54	-323.75	-328.45	-329.99
	Std	1.3196	1.3623	1.1191	2.2942	1.4285	0.03
F10	Mean	-325.6	-322.63	-325.14	-320	-321.41	-322.10
	Std	1.9871	4.0479	2.6135	3.6903	3.4152	3.37
F11	Mean	91.167	91.698	91.293	92.447	91.165	91.91
	Std	0.65567	0.70823	0.67296	0.44508	0.64855	0.63
F12	Mean	-238.13	-64.804	-224.79	-98.765	-121.41	-460.00
	Std	222.15	457.07	277.22	237.39	250.411	0.00
F13	Mean	-129.77	-129.66	-129.78	-129.3	-129.65	-130.00
	Std	0.095197	0.21671	0.10462	0.22568	0.4122	0.00
F14	Mean	-298.87	-298.75	-298.86	-298.57	-298.77	-297.78
	Std	0.28931	0.35812	0.31671	0.17735	0.3214	0.25
F15	Mean	379.16	388.99	406.85	639.77	390.41	120.00
	Std	154.18	146.18	157.16	101.61	185.411	0.00
F16	Mean	261.86	280.98	267	373.48	260.41	312.76
	Std	17.854	33.481	18.718	23.068	18.12	13.90
F17	Mean	276.62	278.69	270.22	399.26	352.41	311.48
	Std	24.911	27.625	22.168	23.941	22.412	25.83
F18	Mean	795.26	911.25	776.61	976.16	845.74	988.43
	Std	208.3	136.76	207.36	92.887	205.11	53.06
Wilcoxon signed-rank test							
(+ /- / \approx)		(11/7/0)	(11/7/0)	(10/8/0)	(16/2/0)	(13/5/0)	
p value		(\approx) 0,472	(\approx) 0,215	(\approx) 0,420	(+) 0,001	(\approx) 0,145	
Friedman test							
Mean Rank Value		2,17	4,39	2,78	5,44	3,61	2,61
Rank		1	5	3	6	4	2

4. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

The manta ray foraging optimization algorithm has advantages such as strong global search capability, few parameters to adjust, and robustness. In this study, a new binary version of the manta ray foraging optimization algorithm was proposed to benefit from the mentioned advantages. At the same time, thanks to the proposed Bin_MRFOA, since the problem can be generalized as desired and the optimum solutions are known, a simple and informative algorithm was obtained to compare with other algorithms on binary optimization problems. The proposed algorithm was first tested for ten classical benchmark functions. Firstly, with this test process, the ideal population size was found. Then, the results of the variants obtained using eight different transfer functions were compared, and it was decided that the most effective transfer function was V4. Furthermore, as a consequence of these

comparisons, it was concluded that the transfer functions of V-shaped are more effective than the transfer functions of S-shaped in general. Then, the most successful variant was run on eighteen CEC2005 benchmark test functions. The obtained results were compared with the algorithms in the literature. The algorithms' performance was interpreted by the Wilcoxon signed-rank and Friedman tests. According to Wilcoxon signed-rank test results, the Bin_MRFOA algorithm outperformed one of the compared algorithms. It performed similarly with the remaining four algorithms and no significant difference was found between them. In addition, among the compared algorithms, the proposed Bin_MRFOA algorithm took second place, revealing that it is a successful and competitive algorithm. Despite successful results, the optimal value could not be reached for functions except for F1, F2, F4, F5, F6, F12, F13, and F15 in all compared algorithms. It would be useful to consider the reason for this situation as a separate research topic. To comment, though, these functions are expensive functions created through rotation, shifting, and hybridization. Most metaheuristic algorithms experience performance decreases in such expensive functions when compared to classical functions. In light of these results, it can be said that the binary algorithms in the study should be strengthened with approaches such as mutation, crossover, similarity measurement technology, etc. that will contribute to the ability to create candidate individuals. In a future study, the performance of Bin_MRFOA on different binary problems can be examined.

Declaration of Ethical Standards

The article complies with ethical rules.

Credit Authorship Contribution Statement

Gülnur YILDIZDAN Conceptualization, Methodology, Designed the Experiments, Writing original draft, Supervision, and Writing review and Editing.

Declaration of Competing Interest

The author declares no conflict of interest.

Funding / Acknowledgements

The author declares that she has no financial support.

Data Availability

Data will be made available on request.

REFERENCES

- [1] R. M. Rizk-Allah, "Hybridizing sine cosine algorithm with multi-orthogonal search strategy for engineering design problems," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 249-273, 2018.
- [2] S. Korkmaz, A. Babalik, and M. S. Kiran, "An artificial algae algorithm for solving binary optimization problems," *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, vol. 9, no. 7, pp. 1233-1247, 2018.
- [3] J. Wang, M. Khishe, M. Kaveh, and H. Mohammadi, "Binary Chimp Optimization Algorithm (BChOA): a New Binary Meta-heuristic for Solving Optimization Problems," *Cognitive Computation*, vol. 13, no. 5, pp. 1297-1316, 2021.
- [4] Q. Al-Tashi, S. J. A. Kadir, H. M. Rais, S. Mirjalili, and H. Alhussian, "Binary optimization using hybrid grey wolf optimization for feature selection," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 39496-39508, 2019.

- [5] E. Baş and E. Ülker, "A binary social spider algorithm for continuous optimization task," *Soft Computing*, vol. 24, no. 17, pp. 12953-12979, 2020.
- [6] M. Aslan, M. Gunduz, and M. S. Kiran, "JayaX: Jaya algorithm with xor operator for binary optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 82, p. 105576, 2019.
- [7] A. G. Hussien, A. E. Hassanien, E. H. Houssein, M. Amin, and A. T. Azar, "New binary whale optimization algorithm for discrete optimization problems," *Engineering Optimization*, vol. 52, no. 6, pp. 945-959, 2020.
- [8] A. C. Cinar and M. S. Kiran, "Similarity and logic gate-based tree-seed algorithms for binary optimization," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 115, pp. 631-646, 2018.
- [9] R. M. Rizk-Allah, A. E. Hassanien, M. Elhoseny, and M. Gunasekaran, "A new binary salp swarm algorithm: development and application for optimization tasks," *Neural Computing and Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 1641-1663, 2019.
- [10] S. Arora and P. Anand, "Binary butterfly optimization approaches for feature selection," *Expert Systems with Applications*, vol. 116, pp. 147-160, 2019.
- [11] M. Mafarja et al., "Binary dragonfly optimization for feature selection using time-varying transfer functions," *Knowledge-Based Systems*, vol. 161, pp. 185-204, 2018.
- [12] T. Akan, S. Agahian, and R. Dehkharghani, "Binbro: Binary battle royale optimizer algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 195, p. 116599, 2022.
- [13] M. Abdel-Basset, R. Mohamed, R. K. Chakraborty, M. Ryan, and S. Mirjalili, "New binary marine predators optimization algorithms for 0-1 knapsack problems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 151, p. 106949, 2021.
- [14] E. Kaya, "BinGSO: galactic swarm optimization powered by binary artificial algae algorithm for solving uncapacitated facility location problems," *Neural Computing and Applications*, pp. 1-20, 2022.
- [15] D. Chauhan and A. Yadav, "Binary Artificial Electric Field Algorithm," *Evolutionary Intelligence*, pp. 1-29, 2022.
- [16] M. A. Sahman and A. C. Cinar, "Binary tree-seed algorithms with S-shaped and V-shaped transfer functions," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 111-117, 2019.
- [17] M. Dehghani et al., "Binary Spring Search Algorithm for Solving Various Optimization Problems," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1286, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1286>.
- [18] Z. Beheshti, "A novel x-shaped binary particle swarm optimization," *Soft Computing*, vol. 25, no. 4, pp. 3013-3042, 2021/02/01 2021, doi: 10.1007/s00500-020-05360-2.
- [19] M. Kalra, V. Kumar, M. Kaur, S. A. Idris, Ş. Öztürk, and H. Alshazly, "A Novel Binary Emperor Penguin Optimizer for Feature Selection Tasks," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 70, pp. 6239-6255, 2022.
- [20] H. Chantar, M. Mafarja, H. Alsawalqah, A. A. Heidari, I. Aljarah, and H. Faris, "Feature selection using binary grey wolf optimizer with elite-based crossover for Arabic text classification," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 16, pp. 12201-12220, 2020/08/01 2020, doi: 10.1007/s00521-019-04368-6.
- [21] M. H. Nadimi-Shahraki, S. Taghian, S. Mirjalili, and L. Abualigah, "Binary Aquila Optimizer for Selecting Effective Features from Medical Data: A COVID-19 Case Study," *Mathematics*, vol. 10, no. 11, p. 1929, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/11/1929>.
- [22] Y. He, F. Zhang, S. Mirjalili, and T. Zhang, "Novel binary differential evolution algorithm based on Taper-shaped transfer functions for binary optimization problems," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 69, p. 101022, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.101022>.

- [23] H. Hakli, "BinEHO: a new binary variant based on elephant herding optimization algorithm," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 22, pp. 16971-16991, 2020/11/01 2020, doi: 10.1007/s00521-020-04917-4.
- [24] A. Pourrajabian, M. Dehghan, and S. Rahgozar, "Genetic algorithms for the design and optimization of horizontal axis wind turbine (HAWT) blades: A continuous approach or a binary one?," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 44, p. 101022, 2021/04/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101022>.
- [25] H. Mohammadzadeh and F. S. Gharehchopogh, "Feature selection with binary symbiotic organisms search algorithm for email spam detection," *International Journal of Information Technology & Decision Making*, vol. 20, no. 01, pp. 469-515, 2021.
- [26] K. K. Ghosh, R. Guha, S. K. Bera, N. Kumar, and R. Sarkar, "S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary Manta ray foraging optimization in feature selection problem," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, no. 17, pp. 11027-11041, 2021/09/01 2021, doi: 10.1007/s00521-020-05560-9.
- [27] Y. Feng and G.-G. Wang, "A binary moth search algorithm based on self-learning for multidimensional knapsack problems," *Future Generation Computer Systems*, vol. 126, pp. 48-64, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.07.033>.
- [28] M. Xi, Q. Song, M. Xu, and Z. Zhou, "Binary African vultures optimization algorithm for various optimization problems," *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2022/11/16 2022, doi: 10.1007/s13042-022-01703-7.
- [29] P. Hu, J.-S. Pan, S.-C. Chu, and C. Sun, "Multi-surrogate assisted binary particle swarm optimization algorithm and its application for feature selection," *Applied Soft Computing*, vol. 121, p. 108736, 2022/05/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108736>.
- [30] A. Banitalebi, M. I. Abd Aziz, and Z. A. Aziz, "A self-adaptive binary differential evolution algorithm for large scale binary optimization problems," *Information Sciences*, vol. 367, pp. 487-511, 2016.
- [31] A. Mohammadzadeh, M. Masdari, F. S. Gharehchopogh, and A. Jafarian, "Improved chaotic binary grey wolf optimization algorithm for workflow scheduling in green cloud computing," *Evolutionary Intelligence*, vol. 14, no. 4, pp. 1997-2025, 2021/12/01 2021, doi: 10.1007/s12065-020-00479-5.
- [32] S. Korkmaz, "İkili optimizasyon problemlerinin çözümü için yapay alg algoritması tabanlı yeni yaklaşımlar," *Doktora Tezi Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya*, 2019.
- [33] W. Zhao, Z. Zhang, and L. Wang, "Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 87, p. 103300, 2020.
- [34] G. Hu, M. Li, X. Wang, G. Wei, and C.-T. Chang, "An enhanced manta ray foraging optimization algorithm for shape optimization of complex CCG-Ball curves," *Knowledge-Based Systems*, vol. 240, p. 108071, 2022/03/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.108071>.
- [35] M. Beşkirli, İ. Koç, H. Haklı, and H. Kodaz, "A new optimization algorithm for solving wind turbine placement problem: Binary artificial algae algorithm," *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 301-308, 2018/06/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.087>.
- [36] M. Beşkirli, I. Koc, and H. Kodaz, "Optimal placement of wind turbines using novel binary invasive weed optimization," *Tehnički vjesnik*, vol. 26, no. 1, pp. 56-63, 2019.
- [37] A. Beşkirli and İ. Dağ, "A new binary variant with transfer functions of Harris Hawks Optimization for binary wind turbine micro-siting," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 668-673, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.154>.
- [38] S. García, D. Molina, M. Lozano, and F. Herrera, "A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study on the CEC'2005 special session on real parameter optimization," *Journal of Heuristics*, vol. 15, no. 6, pp. 617-644, 2009.

- [39] T. Eftimov, P. Korošec, and B. Koroušić Seljak, "A Novel Approach to statistical comparison of meta-heuristic stochastic optimization algorithms using deep statistics," *Information Sciences*, vol. 417, pp. 186-215, 2017/11/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.07.015>.
- [40] J. Derrac, S. García, D. Molina, and F. Herrera, "A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 3-18, 2011.
- [41] Z. Beheshti, "A time-varying mirrored S-shaped transfer function for binary particle swarm optimization," *Information Sciences*, vol. 512, pp. 1503-1542, 2020.
- [42] E. Baş and E. Ülker, "A binary social spider algorithm for uncapacitated facility location problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 161, p. 113618, 2020.
- [43] I. Tariq et al., "MOGSABAT: a metaheuristic hybrid algorithm for solving multi-objective optimisation problems," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 8, pp. 3101-3115, 2020/04/01 2020, doi: [10.1007/s00521-018-3808-3](https://doi.org/10.1007/s00521-018-3808-3).



ÇEVRESEL SESLERİN EVRİŞİMSEL SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI

¹Yalçın DİNÇER , ^{2*} Özkan İNİK 

¹Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Bingöl, TÜRKİYE
²Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tokat,
TÜRKİYE

¹ydincer@bingol.edu.tr, ²ozkan.inik@gop.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Çevresel seslerin sınıflandırılması için özgün evrişimsel sinir ağları tasarlanmıştır.
- Çevresel sesler veri ön işleme ile görüntü formatına çevrilerek sınıflandırılmıştır.
- Önerilen modeller aynı veri setleri üzerinde yapılan diğer temel çalışmalarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



ÇEVRESEL SESLERİN EVRİŞİMSEL SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI

¹Yalçın DİNÇER , ^{2*}Özkan İNİK 

¹Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Bingöl, TÜRKİYE

²Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tokat, TÜRKİYE

¹ydincer@bingol.edu.tr, ²ozkan.inik@gop.edu.tr

(Geliş/Received: 09.11.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.03.2023)

ÖZ: Çevresel faaliyetlerin sonuçlarının tahmini ve aynı zamanda bu faaliyetlerin ortamı hakkında bilgi elde etmek için ses verisinin kullanılması çok önemlidir. Kentlerde meydana gelen gürültü kirliliği, güvenlik sistemleri, sağlık hizmetleri ve yerel hizmetler gibi faaliyetlerin işleyişini ve temel bilgilerini elde etmek için ses verisinden faydalanılmaktadır. Bu anlamda Çevresel Seslerin Sınıflandırması (ÇSS) kritik önem kazanmaktadır. Artan veri miktarı ve çözümlemedeki zaman kısıtlamalarından dolayı anlık otomatik olarak seslerin tanımlanmasını sağlayan yeni ve güçlü yapay zekâ yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer alanlardaki kullanımları ile yüksek doğruluk oranlarını elde eden Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) modelleri ile ihtiyaç duyulan bu yöntemler geliştirilebilir. Bu sebeple yapılan çalışmada iki farklı ÇSS veri setinin sınıflandırılması için ESA tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde ilk olarak sesler görüntü formatına çevrilmiştir. Daha sonra görüntü formatındaki bu seslerin sınıflandırılması için özgün ESA modelleri tasarlanmıştır. Her bir veri seti için tasarlanan birden fazla ESA modelleri içerisinde en yüksek doğruluk oranına sahip ESA modelleri elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri setleri sırasıyla ESC10 ve UrbanSound8K'dır. Bu veri setlerindeki ses kayıtları 32x32x3 ve 224x224x3 boyutuna sahip görüntü formatına çevrilerek 4 farklı görüntü formatında veri seti elde edilmiştir. Bu veri setlerini sınıflandırılması için geliştirilen ESA modelleri sırasıyla, ESC10_ESA32, ESC10_ESA224, URBANSOUND8K_ESA32 ve URBANSOUND8K_ESA224 olarak isimlendirilmiştir. Bu modeller veri setleri üzerinde 10-Kat Çapraz Doğrulama yapılarak eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, ESC10_ESA32, ESC10_ESA224, URBANSOUND8K_ESA32 ve URBANSOUND8K_ESA224 modellerinin ortalama doğruluk oranları sırasıyla %80.75, %82.25, %88.60 ve %84.33 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar aynı veri setleri üzerinde literatürde yapılan diğer temel çalışmalarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin Öğrenme, Evrişimsel Sinir Ağı, Çevresel Ses Sınıflandırılması, ESC10, UrbanSound8K

Classification of Environmental Sounds with Convolutional Neural Networks

ABSTRACT: The use of sound data is critical for predicting the effects of environmental activities and gathering information about the environment of these activities. Sound data is utilized to obtain basic information about the functioning of urban activities such as noise pollution, security systems, health care, and local services. In this sense, Environmental Sound Classification (ESC) is becoming critical. Due to the increasing amount of data and time constraints in analysis, there is a need for new and powerful artificial intelligence methods that enable instant automatic identification of sounds. These methods can be developed with Convolutional Neural Networks (CNN) models, which have achieved high accuracy rates in other fields. For this reason, in this study, a new CNN based method is proposed for the classification of two different CSR datasets. In this method, the sounds are first converted into image format. Then, novel ESA models are designed for the classification of these sounds in image format. For each dataset, the ESA models with the highest accuracy rate were obtained among the multiple ESA models designed. The datasets used in the study are ESC10 and UrbanSound8K, respectively. The sound recordings in these

*Corresponding Author: Özkan İNİK, ozkan.inik@gop.edu.tr

datasets were converted to image format with 32x32x3 and 224x224x3 dimensions, and four different image format datasets were obtained. The CNN models developed to classify these datasets are named ESC10_ESA32, ESC10_ESA224, URBANSOUND8K_ESA32, and URBANSOUND8K_ESA224, respectively. These models were trained on the datasets using 10-fold cross-validation. In the obtained results, the average accuracy rates of the ESC10_ESA32, ESC10_ESA224, URBANSOUND8K_ESA32, and URBANSOUND8K_ESA224 models are 80.75%, 82.25%, 88.60%, and 84.33%, respectively. When these results are compared with other baseline studies in the literature on the same datasets, it is seen that these models achieve better results.

Keywords: *Deep Learning, Convolutional Neural Network, Environmental Sound Classification, ESC10, UrbanSound8K*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ses verisi, görsel verinin sağlayabileceği bilginin yanı sıra anlamsal olarak daha zengin bilgi içerir [1]. Özellikle görsel olarak izlenemeyen bir ortam hakkında bilgi elde edebilmek için ses verisi kullanılabilir. Günlük hayatta bazı uygulamaların gerçekleştirilmesi için konuşma ve müzik seslerinin aksine çevresel seslerin kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple son yıllarda çevresel seslerin sınıflandırılması üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. ÇSS, konuşma dışı ses sınıflandırma görevinin en önemli konularından biri olarak bilinir [2]. ÇSS ile ilgili, gürültü kirliliği analizi [3, 4], gözetleme sistemleri [5-7], makinenin duyması [8-11], çevresel gözetleme [12], cinayetlerin önceden kestirilmesi [13] ve akıllı şehirler [14, 15] gibi uygulamalar mevcuttur.

Literatürde ÇSS için farklı istatistiksel ve klasik makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır [16-23]. Derin öğrenmenin [24] 2012 yılından imageNet [25] yarışması ile yüksek bir başarı değeri elde ettiğinden dolayı birçok farklı problemlerin çözümlenmesinde kullanılmaya başlanılmıştır. Elde edilen bu başarıdan dolayı farklı alanlarda kullanılmaya başlandığı gibi son yıllarda ÇSS için derin öğrenme modelleri sıklıkla kullanılmaya başlamıştır [26-40]. Piczak [26] tarafından yapılan çalışmada üç farklı veri setinin sınıflandırılmasında ESA modeli kullanılmış. Önerilen ESA modeli iki konvolüsyon katmanı bir ortaklama katmanı ve iki tamamen bağlı katmandan oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlarda ESA modelinin mevcut diğer yöntemlere göre daha iyi performans sergilediği göstermiştir. Salamon ve Bello [27] tarafından yapılan çalışmada iki temel amaç hedeflemiştir. Birincisi ÇSS'nin sınıflandırılması için ESA modelinin kullanılması, ikincisi ise ESA modellerinin eğitilmesi için gereken yüksek miktarda verilerin elde edilmesi için veri artırma işlemleri yapılmıştır. Veri artırma ile ESA modelinin daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Takahashi ve ark. [28] akustik olayların tespiti için VGGNET'ten ilham alınarak yeni bir ESA modeli ve eğitim işlemlerinde verilerin artırılması için yeni bir yöntem önermiştir. Derin öğrenme modellerinin eğitim aşamasında verilerin modeli beslenmesi için farklı bir strateji Tokozume ve ark. [29] geliştirmiştir. Sınıflar arası öğrenme (Between-Class learning) adındaki bu yöntemde farklı sınıflara ait iki sesi rastgele oranlarda karıştırarak sınıflar arası sesler üretilmektedir. Yapılan çalışmada sınıflar arası öğrenme yönteminin ses tanıma ağlarında ve veri artırmada iyi performans sergilediği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca ÇSS'nin sınıflandırılması için bir ağ tanımlanmış olup önerilen yöntem ile eğitilmiş. Elde edilen sonuçlar, insan ses tanıma hata değerinden daha düşük değerler olduğu ifade edilmiştir. Boddapatia ve ark. [30] AlexNet ve GoogLeNet derin öğrenme modelleri kullanılarak ESC10, ESC50 ve UrbanSound8K veri setlerinde sınıflandırma işlemi gerçekleştirmiştir. Veri setlerindeki ses sinyalleri spectrogram, MFCC ve CRP yöntemleri kullanılarak görüntü haline çevrilmiş. Daha sonra elde edilen görüntülerde AlexNet ve GoogLeNet kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Li ve ark. [31] yaptıkları çalışmada özgün bir yığılmış ESA modeli önermişlerdir. Önerilen ağda azaltılmış filtre sayıları ile çoklu konvolüsyon katmanları kullanmışlardır. Yöntemde log-mel özellikleri ile ham ses sinyal verileri kullanılarak iki farklı ESA ağı eğitilmektedir. Bu iki model daha sonra Dempster-Shafer (DS) kanıt teorisi kullanılarak birleştirilip ÇSS için DS-CNN adında yeni bir model önermişlerdir. Önerilen modelin ESC10, ESC50 ve UrbanSound8K veri setlerinde ESA tabanlı diğer modellere göre daha iyi performans sergilediği belirtmişlerdir. Su ve ark. [32] yaptıkları çalışmada

ÇSS'nin daha kapsamlı temsil edilmesi için iki farklı özelliğinin birleştirilmesini önermişlerdir. Sınıflandırma işlemi için dört katmanlı bir ESA ağı tasarlamışlardır. Farklı özelliklerle eğitilen ESA ağları DS kanıt teorisi kullanılarak birleştirmişlerdir. Önerilen TSCNN-DS modeli UrbanSound8K veri setinde %97.2 doğruluk oranı elde etmiştir. Mushtaq ve ark. [33] tarafından yapılan çalışmada akustik kaynak ile mikrofon arsında mesafe ile çevrede birçok ses kaynağının dâhil olmasıyla seslerin üst üste binmesi karmaşıklığı arttırdığını vurgulamışlardır. Bu karmaşıklığı ÇSS'nin doğrulanmış ses özellikleriyle birlikte derin konvolüsyonlu sinir ağı kullanmışlardır. Çalışmalarında ESC-10, ESC-50 ve kentsel ses (Us8k) veri kümeleri için üç ses özniteliği çıkarma tekniği, Mel spektrogramı (Mel), Mel Frekans Cepstral Katsayısı (MFCC) ve Log-Mel düşünülmüş. Aşırı uyum riskini kaldırmak içinde maksimum ortaklama işlemi uygulamışlardır. Elde edilen doğruluk değerleri sırasıyla ESC-10, ESC-50 ve US8K için %94.94, %89.28 ve %95.37 olarak elde etmişlerdir. Mushtaq ve ark. [34] tarafından yapılan çalışmada verilerin anlamlı bir şekilde arttırılarak ESA ile sınıflandırılmada spektral görüntüler üzerine bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Sunulan yaklaşımda kullanılan Mel spektrogram özelliğidir. Rastgele seçilen 7 veya 9 katmanlı ESA modelleri ile ESC-10, ESC-50 ve Us8k verileri kullanılmıştır. Doğrudan ses üzerinden anlamlı veri arttırma yöntemi kullanılarak etkin ve yüksek doğruluk elde edildiği vurgulanmıştır. Kullanılan modeller arasında ResNet-52, ESC-10 için %99.04, Us8k veri kümeleri için %99.49 ve DenseNet-161, ESC-50 için % 97.57 doğruluk oranlarına ulaşmışlardır. Chen ve ark. [35] tarafından yapılan çalışmada ÇSS problemi genişletilmiş ESA ile ele almışlardır. Bu yapının kullanılması ile konvolüsyon katmanından sonra kullanılan max-ortaklama işleminden daha yüksek sınıflama doğruluğu sonucu elde edildiği belirtmişlerdir. Aynı zamanda farklı genişleme oranları ile evrişim katmanı sayısının sonuçlara olan etkisini araştırmışlardır. ÇSS probleminde genişletilmiş ESA, maksimum ortaklamalı ESA'dan daha iyi sonuçlar elde ettiği; fakat filtrelerin sayısı ve oranının artırılması sınıflama doğruluğunu olumsuz yönde etkilediği ifade etmişlerdir. Abdoli ve ark. [36] tarafından yapılan çalışmada ÇSS sınıflandırılması için bir boyutlu (1D) ESA ağı kullanmışlardır. Giriş verisi için ses sinyali üzerinden çerçeveler alınmış. İnsan işitsel yapısını modelleyen bir Gammatone filtre bankası ile ESA'nın giriş katmanının başlatılması ve farklı girdi filtre boyutlarını oluşturan farklı mimarileri araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda UrbanSound8K veri seti üzerinde %89 ortalama doğruluk değeri elde etmişlerdir. Ham giriş verisinin kullanılması ile uçtan uca yapılan çalışmalar içerisinde en iyi performans sergilediği ifade etmişlerdir. Ayrıca önerilen yöntemin literatürdeki diğer modellerden daha az parametreye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Medhat ve ark. [37] tarafından Koşullu Sinir Ağı (CLNN) ve onun uzantısı olan Maskeli Koşullu Sinir Ağı (MCLNN) önerilmiş. Yapılan çalışmada sesin doğal halinden faydalanılarak sesin zaman-frekans gösterimini modellemişlerdir. Önerilen MCLNN ile farklı müzik ve ÇSS'lerin sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. MCLNN sınıflama doğruluğu ESA tabanlı modellerden daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir. Zhang ve ark. [38] tarafından yapılan çalışmada ESA'lardaki evrişim katmanındaki filtrelerin boyutları ve aktivasyon fonksiyonlarının ÇSS'ye etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla genişletilmiş ESA tabanlı bir model (D-CNN-ESC) önermişlerdir. Önerilen sistem üç farklı ses veri setine uygulanmış. UrbanSound8K veri setinde diğer yöntemlere göre %10 daha az hata değeri elde edilmiştir. Lim ve ark. [39] tarafından yapılan çalışmada ses olaylarının sınıflandırılması için ESA tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem UrbanSound8K [41], BBC Sound FX [42], DCASE2016 [43], ve FREESOUND veri setleri üzerinde 30 farklı ses olayının %81,5 doğruluk oranında sınıflandırdığı görülmüştür. Akbal'ın [40] yapmış olduğu çalışmada çevresel seslerden meydana gelen faaliyetin konumunu belirlemek, dijital adli tıp için önemli olduğu vurgulanmış. ESC ile konum belirlenmiş ve bunun için kararlı özellik çıkarma yöntemi sunulmuştur. Çalışılan bu yöntemin 3 temel aşamadan meydana geldiğini, bunlar özellik oluşturma, seçme ve sınıflandırma işlemlerini kapsadığını belirtmektedirler. Özellik çıkarımı için tek boyutlu yerel ikili desen (1D-LBP), tek boyutlu üçlü desen (1D-TP) ve istatistiksel özellik oluşturma yöntemleri, sınıflandırma için de kübik (3. Polinom Dereceli Çekirdek) destek vektör makinesi kullanmışlardır. Bu çalışmada önerilen yöntem ESC-10 veri setine uygulanıp veri setindeki seslerin sınıflandırılması sağlanmıştır. Bu önerilen yöntem ile % 90.25 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Son olarak İnik [44] tarafından yapılan çalışmada ÇSS için ESA modellerinin parametre optimizasyonu yapılarak yüksek doğruluk oranlarını elde etmiştir. Parametre optimizasyonu

için parçacık sürü optimizasyonu yeniden düzenlenerek ESA parametreleri bir dönüştürme işlemi yapılmayarak optimize edilmiştir. Derin öğrenme modelleri ile elde edilen başarı oranları makine öğrenmesi veya diğer yöntemler ile elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun temel sebebi, derin öğrenme modellerindeki özellik keşfinin otomatik yapılması olarak özetlenebilir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ÇSS'nin sınıflandırılmasına yönelik başarı oranlarının arttırabilir olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın devamında Bölüm 2'de kullanılan materyal ve metot hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır. Bu bölümde ESA hakkında bilgiler ve kullanılan ses veri setleri detaylıca anlatılmıştır. Bölüm 3'te önerilen yöntemin mimarisi ve bu mimaride geliştirilen ESA modellerinin özellikleri sunulmuştur. Bölüm 4'te deneysel çalışmalar verilmiştir. Bu bölümde öncelikle performans ölçütleri hakkında gerekli açıklamalar yapılarak, önerilen yöntemin diğer yöntemlerle test sonuçları karşılaştırılıp gerekli tartışmalar yapılmıştır. Bölüm 5'de, sonuçlar ve tartışma bilgileri verilmiştir.

2. MATERYAL (MATERIAL)

2.1. Evrişimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network)

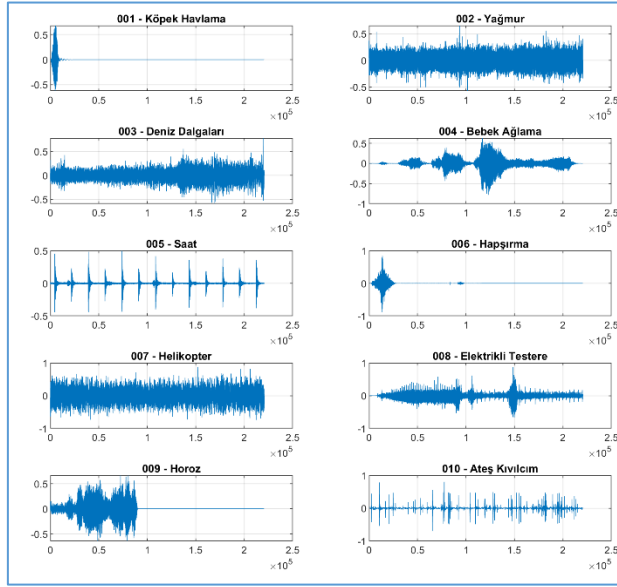
Derin öğrenmenin ana mimarisi olarak kabul edilen ESA, öğrenme işlemi ham veri üzerinde yaparak kendine özgü özellikleri keşfetmesi sonucunda; sınıflandırma, tanımlama, segmentasyon gibi problemlerde yüksek performans sergilemektedir [45]. Bu sebeple mühendislik, tıp, savunma sanayisi gibi birçok alanda kullanılması sonucunda yaygın hale gelmiştir. Özellikle otomatik özellik keşfi sayesinde devasa verilerde kullanılması ile Amazon, Google, Facebook gibi firmaların algoritmalarında kullanmaya başlamasıyla daha popüler hale gelmiştir [46]. ESA'lar nesnelere tanımlanmasında art arda gelen birden çok katmandan oluşan bir katmanın çıktısı diğer katmanın girdisi olan ileri beslemeli çalışma prensibine dayanan ve genel olarak nesnelere parçalayarak özellik haritalarını çıkararak ağı eğitmesini sağlayan otomatik sistemlerdir. ESA'ların özellik haritalarını kendi çıkarmasının sağlamış olduğu avantajın yanı sıra araştırmacının kullanacağı modelde katman sayısı, katman dizilişi ve bu katmanlardaki parametreleri belirlemede özgür bırakılmıştır. Bu sayede araştırmacıya oluşturacağı modelde en yüksek performans oranına ulaşmasında sayısız deneme alanı bırakılmıştır.

2.2. Veri Setleri (Datasets)

Literatürde son yıllarda yapılan çevresel seslerin sınıflandırılması için yoğun olarak kullanılan iki farklı veri seti bulunmaktadır. Bu veri setleri sırasıyla ESC10 ve UrbanSound8K'dır. Bu veri setleri hakkında detaylı bilgileri aşağıda verilmiştir.

2.2.1. ESC 10 Veri Seti (ESC10 Data Set)

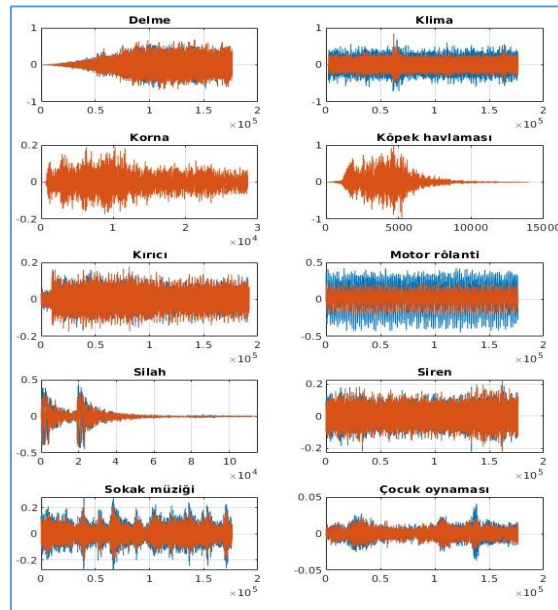
ESC10 veri seti Karol J. Piczak [47] tarafından oluşturulmuştur. Veri setinde toplam 10 sınıf bulunmaktadır bu sınıflar sırasıyla köpek havlama sesi, yağmur sesi, deniz dalga sesi, bebek ağlama sesi, saat tik-tok sesi, hapşırma sesi, helikopter sesi, elektrikli testere sesi, horoz sesi, ateş kıvılcım sesidir. Her bir sınıfta 40 tane ses kaydı bulunmaktadır. Her bir kayıt ortalama 5 saniye uzunluktaki kayıttan oluşmaktadır. Veri setindeki her bir sınıfa ait seslerin örnek bir gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Bu veri seti ESC50 veri setinin bir alt kümesidir. Belli bir standardın elde edilmesi için ilk olarak bu veri seti oluşturulmuştur.



Şekil 1. ESC-10 veri setindeki sınıflara ait kayıtların grafiksel gösterimi
 Figure 1. Graphical representation of records of classes in the ESC-10 dataset.

2.2.2. UrbanSound8K Veri Seti (UrbanSound8K Data Set)

Bu veri seti Salamon ve ark. [41] tarafından hazırlanan 8732 etiketli seslerden oluşan bir veri setidir. Veri setindeki her bir kayıt yaklaşık 4 saniye uzunluğundadır. Bu veri seti www.freesound.org sitesinde yüklenen kayıtlar içerisinde elde edilmiştir. Veri seti toplamda 10 sınıfa sahiptir. Bu sınıflar sırasıyla; klima, araba kornası, oynayan çocuklar, köpek havlaması, delme, motor rölantisi, silah sesi, kırıcı, siren ve sokak müziği şeklindedir. Bu veri setindeki her bir sınıfa ait seslerin grafiksel bir gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.

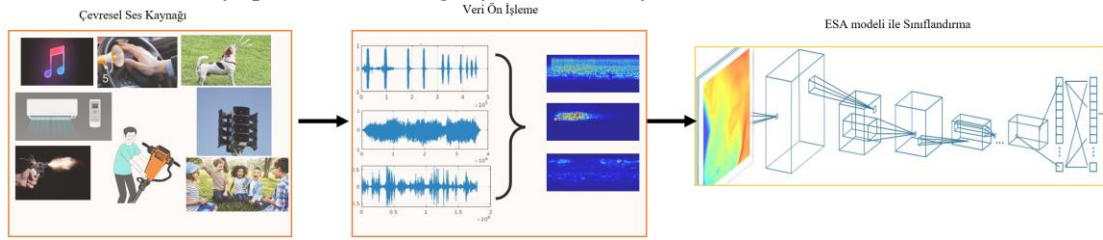


Şekil 2. UrbanSaund8k veri setindeki sınıflardaki her bir kayda ait örnek gösterim
 Figure 2. Example representation of each record in the classes in the UrbanSaund8k dataset.

3. ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

Yapılan bu çalışması için önerilen yöntemin mantıksal tasarımı Şekil 3'te verilmiştir. Önerilen yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada veri setinin ESA modellerinde kullanılmak üzere ön işlemlerin yapılması, ikinci aşamada ise bu veri setlerinin sınıflandırılması için özgün ESA modellerinin tasarlanması, eğitilmesi ve test edilmesi içermektedir. Birinci aşamada literatürde sıklıkla kullanılan ve belli standartlarda elde edilmiş iki farklı veri setinde her bir kayıt ESA modellerinin eğitilmesi için sinyal formatında görüntü formatına çevrilmiştir. Çevirim işlemi Matlab Wavelet modülü ile gerçekleştirilmiştir. Ses sinyalleri bu modülde ki scalogram yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Scalogram, zaman ve frekansın bir fonksiyonu olarak çizilen bir sinyalin Sürekli Dalgacık Dönüşümünün (CWT) mutlak değeri olarak ifade edilir.

Dönüşüm işleminden sonra ESA modellerinin eğitilmesi için her iki veri setindeki görüntüler $32 \times 32 \times 3$, $224 \times 224 \times 3$ boyutlarında olmak üzere iki farklı veri seti oluşturulmuştur. Böylelikle ESA modellerinin eğitilmesi için dört farklı veri seti elde edilmiştir. İkinci aşamada elde edilen veri setlerine uygun olarak ESA modelleri tasarlanmıştır. Her bir veri seti için birden fazla ESA modelleri tasarlanmış olup bu modeller içerisinde en iyi performansı sergileyen model kaydedilmiştir.



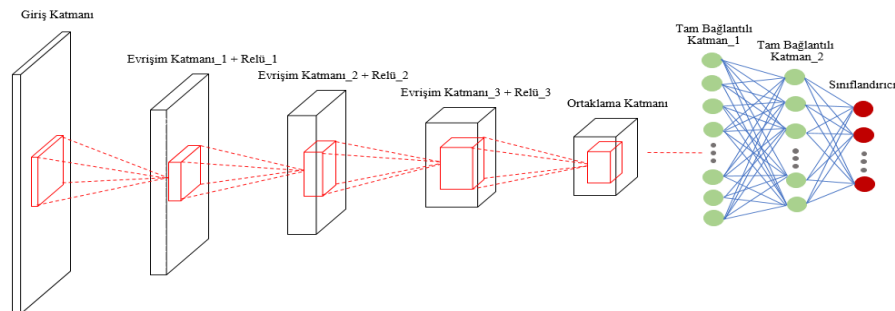
Şekil 3. Önerilen yöntemin mantıksal tasarımı

Figure 3. Architecture of the proposed method

Şekil 3'te gösterilen yöntemde, en iyi sonucu veren dört adet ESA modeli elde edilmiştir. Bu modeller sırasıyla ESC10_ESA32, ESC10_ESA224, URBANSOUND8K_ESA32, URBANSOUND8K_ESA224 şeklinde isimlendirilmiştir. Bu modellerin tasarım yapıları ve parametreleri hakkında detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

3.1. ESC10_ESA32 Modeli (ESC10_ESA32 Model)

Bu model ESC10 veri setinin $32 \times 32 \times 3$ giriş görüntü boyutuna sahip veriler için tasarlanmıştır. Modelin tasarım mimarisi Şekil 4'te verilmiştir. Bu mimarideki birinci evrişim katmanındaki filtreler Şekil 5 ve bu filtrelerin giriş görüntüsüne uygulamasından sonra elde edilen özellik haritaları Şekil 6'da verilmiştir. Bu mimariye ait bütün parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 4. ESC10_ESA32 modelinin mimarisi

Figure 4. Architecture of model ESC10_ESA32

Çizelge 1. ESC10_ESA32 modelindeki her bir katmana ait parametre değerleri

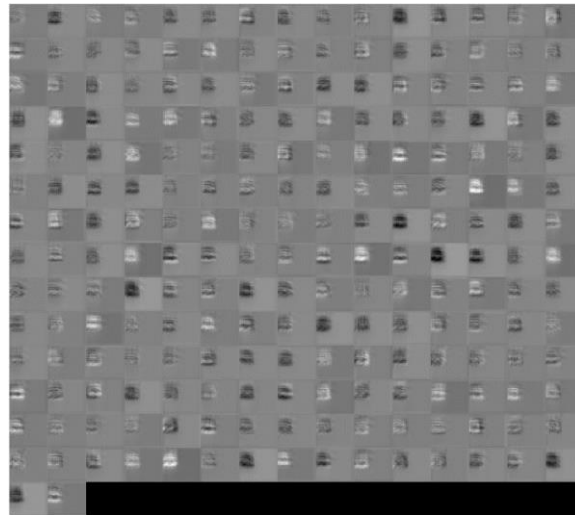
Table 1. Parameter values for each layer in the ESC10_ESA32 model

Katman Sırası	Katman Adı	Boyut	Filtre Sayısı	Filtre Boyutu	Adım Sayısı	Parametreler	Toplam Parametre Sayısı
1	Giriş Katmanı	32x32x3	-	-	-	-	0
2	Evrişim Katmanı_1	32x32x212	212	5x5	1x1	5x5x3x212	15900
3	Relü katmanı_1	32x32x212	-	-	-	-	0
4	Evrişim Katmanı_2	32x32x71	71	4x4	1x1	4x4x212x71	240832
5	Relü katmanı_2	32x32x71	-	-	-	-	0
6	Evrişim Katmanı_3	32x32x191	191	6x6	1x1	6x6x71x191	488196
7	Relü katmanı_3	32x32x191	-	-	-	-	0
8	Ortalama Ortaklama	8x8x191	-	2x2	4x4	-	0
9	Tam Bağlantılı Katman_1	1x1x893	-	-	-	893x12224	10916032
10	Düğüm seyreltme katmanı	1x1x893	-	-	-	-	0
11	Relü katmanı_4	1x1x893	-	-	-	-	0
12	Tam Bağlantılı Katman_2	1x1x50	-	-	-	50x893	44650
13	Softmax	1x1x50	-	-	-	-	0
14	Sınıflandırma Katmanı	1x1x50	-	-	-	-	0



Şekil 5. ESC10_ESA32 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtreler

Figure 5. Filters in the first convolutional layer of the model ESC10_ESA32

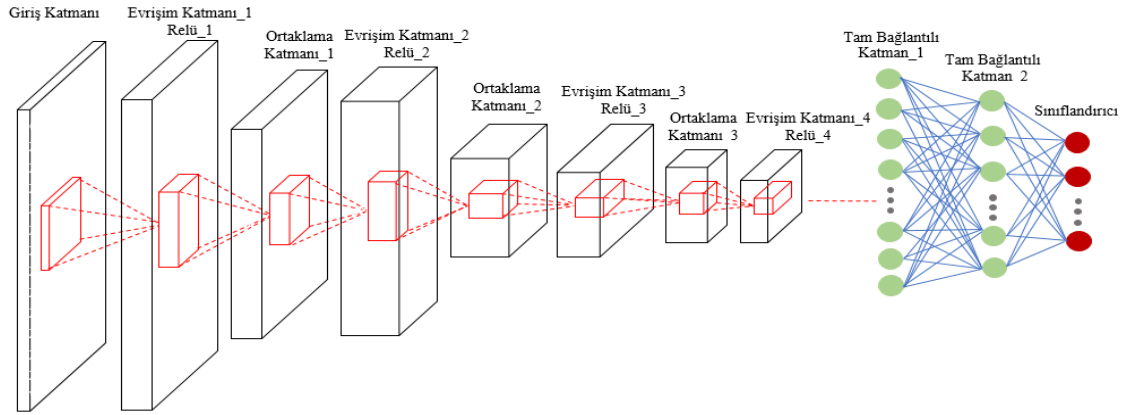


Şekil 6. ESC10_ESA32 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtrelerin giriş görüntüsüne uygulandıktan sonra elde edilen özellik haritaları

Figure 6. Feature maps obtained after applying the filters in the first convolution layer of the ESC10_ESA32 model to the input image.

3.2. ESC10_ESA224 Modeli (ESC10_ESA224 Model)

Bu model ESC10 veri setinin $224 \times 224 \times 3$ giriş görüntü boyutuna sahip veriler için tasarlanmıştır. Modelin tasarım mimarisi Şekil 7’de verilmiştir. Bu mimarideki birinci evrişim katmanındaki filtreler Şekil 8 ve bu filtrelerin giriş görüntüsüne uygulamasından sonra elde edilen özellik haritaları Şekil 9’da verilmiştir. Bu mimariye ait bütün parametreler Çizelge 2’de verilmiştir.



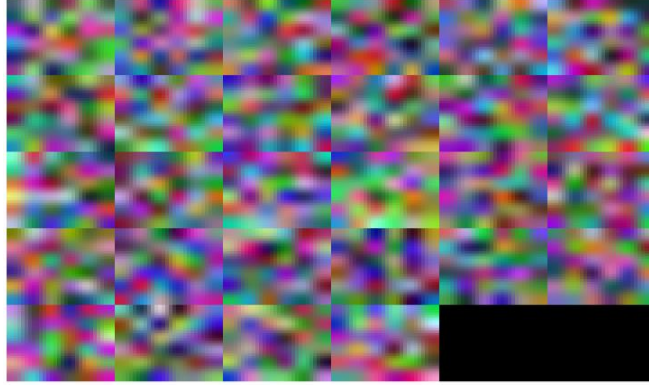
Şekil 7. ESC10_ESA224 modelinin mimarisi

Figure 7. Architecture of model ESC10_ESA224

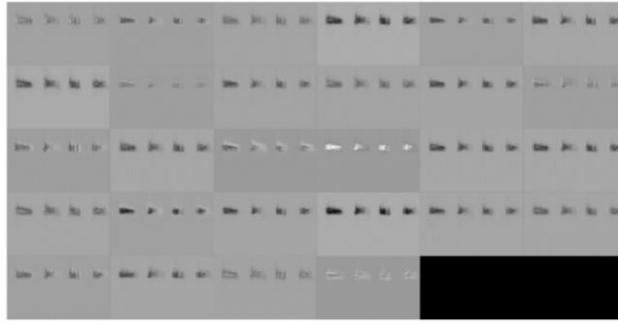
Çizelge 2. ESC10_ESA224 modelindeki her bir katmana ait parametre değerleri

Table 2. Parameter values for each layer in the ESC10_ESA224 model

Katman Sırası	Katman Adı	Boyut	Filtre Sayısı	Filtre Boyutu	Adım Sayısı	Parametreler	Toplam Parametre Sayısı
1	Giriş Katmanı	$224 \times 224 \times 3$	-	-	-	-	0
2	Evrişim Katmanı_1	$224 \times 224 \times 28$	28	6×6	1×1	$6 \times 6 \times 3 \times 28$	3024
3	Relü katmanı_1	$224 \times 224 \times 28$	-	-	-	-	0
4	Mak. Ortaklama Katmanı_1	$111 \times 111 \times 28$	-	4×4	2×2	-	0
5	Evrişim Katmanı_2	$111 \times 111 \times 174$	174	2×2	1×1	$2 \times 2 \times 28 \times 174$	19488
6	Relü katmanı_2	$111 \times 111 \times 174$	-	-	-	-	0
7	Maksimum Ortaklama Katmanı_2	$36 \times 36 \times 174$	-	6×6	3×3	-	0
8	Evrişim Katmanı_3	$36 \times 36 \times 129$	129	6×6	1×1	$6 \times 6 \times 174 \times 129$	808056
9	Relü katmanı_3	$36 \times 36 \times 129$	-	-	-	-	0
10	Mak. Ortaklama Katmanı_3	$5 \times 5 \times 129$	-	4×4	7×7	-	0
11	Evrişim Katmanı_4	$5 \times 5 \times 80$	80	5×5	1×1	$5 \times 5 \times 129 \times 80$	258000
12	Relü katmanı_4	$5 \times 5 \times 80$	-	-	-	-	0
13	Tam Bağlantılı Katman_1	$1 \times 1 \times 897$	-	-	-	897×2000	1794000
14	Düğüm Seyreltme Katmanı	$1 \times 1 \times 897$	-	-	-	-	0
15	Relü katmanı_5	$1 \times 1 \times 897$	-	-	-	-	0
16	Tam Bağlantılı Katman_2	$1 \times 1 \times 10$	-	-	-	10×897	8970
17	Softmax	$1 \times 1 \times 10$	-	-	-	-	0
18	Sınıflandırma Katmanı	$1 \times 1 \times 10$	-	-	-	-	0



Şekil 8. ESC10_ESA224 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtreler
 Figure 8. Filters in the first convolutional layer of the ESC10_ESA224 model

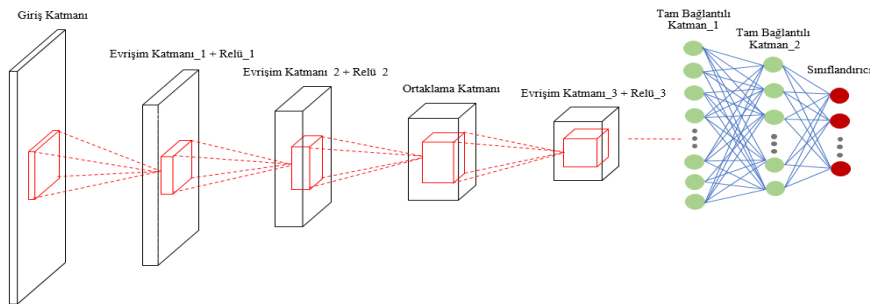


Şekil 9. ESC10_ESA224 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtrelerin giriş görüntüsüne uygulandıktan sonra elde edilen özellik haritaları

Figure 9. Feature maps obtained after applying the filters in the first convolution layer of the ESC10_ESA224 model to the input image.

3.3. URBANSOUND8K_ESA32 Modeli (URBANSOUND8K_ESA32 Model)

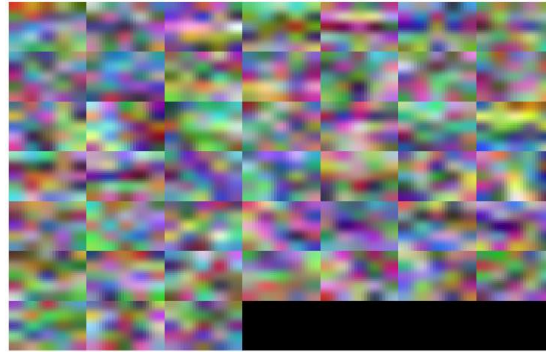
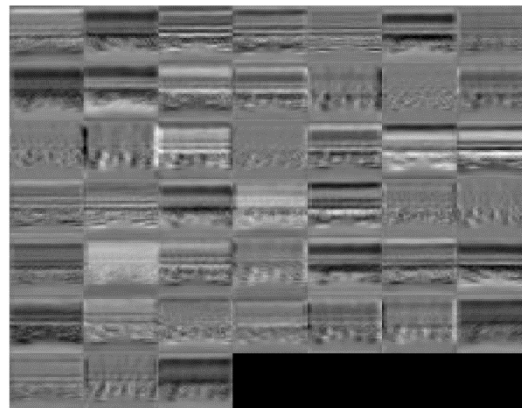
Bu model URBANSOUND8K_ESA32 veri setinin 32x32x3 giriş görüntü boyutuna sahip veriler için tasarlanmıştır. Modelin tasarım mimarisi Şekil 10'da verilmiştir. Bu mimarideki birinci evrişim katmanındaki filtreler Şekil 11 ve bu filtrelerin giriş görüntüsüne uygulamasından sonra elde edilen özellik haritaları Şekil 12'de verilmiştir. Bu mimariye ait bütün parametreler Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 10. URBANSOUND8K_ESA32 modelinin mimarisi
 Figure 10. Architecture of model URBANSOUND8K_ESA32

Çizelge 3. URBANSOUND8K_ESA32 modelindeki her bir katmana ait parametre değerleri*Table 3. Parameter values for each layer in the URBANSOUND8K_ESA32 model*

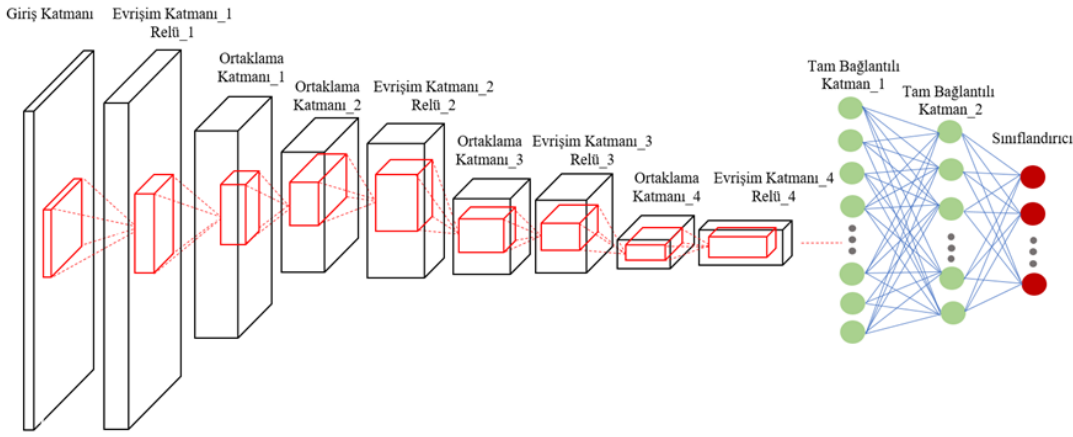
Katman Sırası	Katman Adı	Boyut	Filtre Sayısı	Filtre Boyutu	Adım Sayısı	Parametreler	Toplam Parametre Sayısı
1	Giriş Katmanı	32x32x3	-	-	-	-	0
2	Evrişim Katmanı_1	32x32x45	45	5x5	1x1	5x5x3x45	3375
3	Relü katmanı_1	32x32x45	-	-	-	-	0
4	Evrişim Katmanı_2	32x32x193	193	8x8	1x1	8x8x45x193	555840
5	Relü katmanı_2	32x32x193	-	-	-	-	0
6	Ort. Ortaklama Katmanı	10x10x193	-	3x3	3x3	-	0
7	Evrişim Katmanı_3	10x10x139	139	10x10	1x1	10x10x193x139	2682700
8	Relü katmanı_3	10x10x139	-	-	-	-	0
9	Tam Bağlantılı Katman_1	1x1x891	-	-	-	891x13900	12384900
10	Düğüm Seyreltme Katmanı	1x1x891	-	-	-	-	0
11	Relü katmanı_4	1x1x891	-	-	-	-	0
12	Tam Bağlantılı Katman_2	1x1x10	-	-	-	10x891	8910
13	Softmax	1x1x10	-	-	-	-	0
14	Sınıflandırma Katmanı	1x1x10	-	-	-	-	0

**Şekil 11.** URBANSOUND8K_ESA32 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtreler*Figure 11.* Filters in the first convolutional layer of the URBANSOUND8K_ESA32 model**Şekil 12.** URBANSOUND8K_ESA32 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtrelerin giriş görüntüsüne uygulandıktan sonra elde edilen özellik haritaları*Figure 12.* Feature maps obtained after applying filters in the first convolution layer of the URBANSOUND8K_ESA32 model to the input image.

3.4. URBANSOUND8K_ESA224 Modeli (URBANSOUND8K_ESA224 Model)

Bu model URBANSOUND8K_ESA224 veri setinin 224x224x3 giriş görüntü boyutuna sahip veriler için tasarlanmıştır. Modelin tasarım mimarisi Şekil 13'te verilmiştir. Bu mimarideki birinci evrişim

katmanındaki filtreler Şekil 14 ve bu filtrelerin giriş görüntüsüne uygulamasından sonra elde edilen özellik haritaları Şekil 15'te verilmiştir. Bu mimariye ait bütün parametreler Çizelge 4'te verilmiştir.



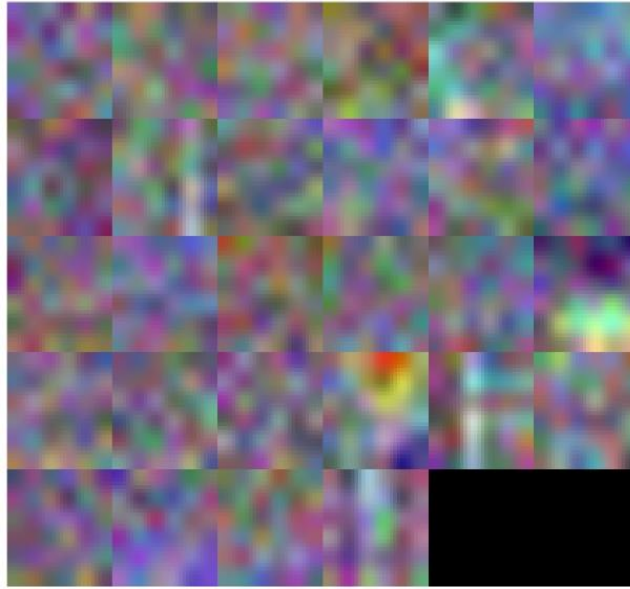
Şekil 13. URBANSOUND8K_ESA224 modelinin mimarisini

Figure 13. Architecture of model URBANSOUND8K_ESA224

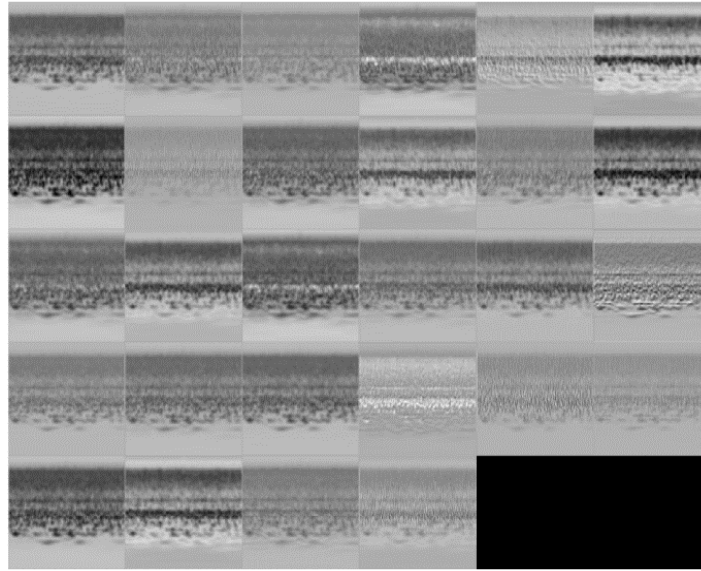
Çizelge 4. URBANSOUND8K_ESA224 modelindeki her bir katmana ait parametre değerleri

Table 4. Parameter values for each layer in the URBANSOUND8K_ESA224 model

Katman Sırası	Katman Adı	Boyut	Filtre Sayısı	Filtre Boyutu	Adım Sayısı	Parametreler	Toplam Parametre Sayısı
1	Giriş Katmanı	224x224x3	-	-	-	-	0
2	Evrişim Katmanı_1	224x224x28	28	6x6	1x1	6x6x3x28	3024
3	Relü katmanı_1	224x224x28	-	-	-	-	0
4	Mak. Ortaklama Katmanı_1	111x111x28	-	4x4	2x2	-	0
	Mak. Ortaklama Katmanı_2	36x36x28	-	6x6	3x3	-	0
5	Evrişim Katmanı_2	36x36x174	174	2x2	1x1	2x2x28x174	19488
6	Relü katmanı_2	36x36x174	-	-	-	-	0
7	Mak. Ortaklama Katmanı_3	11x11x174	-	6x6	3x3	-	0
8	Evrişim Katmanı_3	11x11x129	129	6x6	1x1	6x6x174x129	808056
9	Relü katmanı_3	11x11x129	-	-	-	-	0
10	Mak. Ortaklama Katmanı_4	4x4x129	-	4x4	2x2	-	0
11	Evrişim Katmanı_4	4x4x180	180	5x5	1x1	5x5x129x180	580500
12	Relü katmanı_4	4x4x180	-	-	-	-	0
13	Tam Bağlantılı Katman_1	1x1x897	-	-	-	897x2880	2583360
14	Düğüm Seyreltme Katmanı	1x1x897	-	-	-	-	0
15	Relü katmanı_5	1x1x897	-	-	-	-	0
16	Tam Bağlantılı Katman_2	1x1x10	-	-	-	10x897	8970
17	Softmax	1x1x10	-	-	-	-	0
18	Sınıflandırma Katmanı	1x1x10	-	-	-	-	0



Şekil 14. URBANSOUND8K_ESA224 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtreler
Figure 14. Filters in the first convolutional layer of the URBANSOUND8K_ESA224 model



Şekil 15. URBANSOUND8K_ESA224 modelinin birinci evrişim katmanındaki filtrelerin giriş görüntüsüne uygulandıktan sonra elde edilen özellik haritaları

Figure 15. Feature maps obtained after applying filters in the first convolution layer of the URBANSOUND8K_ESA224 model to the input image.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada ÇSS için iki farklı veri seti üzerinde farklı ESA modelleri giriş görüntü boyutuna göre eğitim işlemleri gerçekleştirilmiştir. 32x32x3 ve 224x224x3 giriş görüntü boyutuna sahip veri setleri üzerinde 10-Kat Çapraz Doğrulama (10-Fold Cross Validation) yapılarak modeller eğitilmiştir. ESA modellerinin eğitilmesi için Matlab R2020a yazılımının Derin Öğrenme kütüphanesi kullanılmıştır. Yapılan tüm eğitim ve test işlemleri üzerinde Intel Core i9-7900X 3.30GHz×20 işlemci, 64 GB Ram ve 2 x GeForce RTX2080Ti ekran kartı bulunduran özellikte bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Modellerin eğitimi için kullanılan parametreler Çizelge 5'te verilmiştir. Modellerin başarı ölçütleri doğruluk değerine göre

yapılmıştır. Bu bölümde her bir modelin eğitim aşamasındaki elde ettikleri yakınsama grafikleri, performans değerleri ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 5. ESA'ların eğitiminde kullanılan parametrelerin değerleri

Parametre Adı		Parametre Değeri
Optimizasyon algoritması		SGDM
Başlangıç öğrenme oranı		0.001
Devir sayısı		50
Paket boyutu		64
Öğrenme hızı düşme faktörü		0.8
Öğrenme hızı düşme periyodu		10

4.1. Başarı Metrikleri (Performance Metrics)

Bu çalışmada tasarlanan ESA modellerinin performans ölçütleri karışıklık matrisi [48] kullanılarak elde edilmiştir. Karışıklık matrisi yapılacak bir sınıflandırma işleminde gerçekte olan ve tahmin edilen sınıflar hakkında bilgi verir. İki boyutta olan karışıklık matrisi bir boyutu nesnenin gerçekte olan sınıfını gösterirken diğer boyutu sınıflandırıcı tarafından tahmin edilen boyutu gösterir [49]. Karışıklık matrisindeki örneklem ifadeleri Şekil 16'da verilmiştir.

KARIŞIKLIK MATRİSİ		TAHMİN EDİLEN DEĞER	
		Pozitif	Negatif
GERÇEK DEĞER	Pozitif	Doğru Pozitif (TP)	Yanlış Pozitif (FP)
	Negatif	Yanlış Negatif (FN)	Doğru Negatif (TN)

Şekil 16. Karışıklık matrisi

Figure 16. confusion matrix

TP: Pozitif örneğin doğru sınıflandırılması işlemidir.

TN: Negatif örneğin doğru sınıflandırılması işlemidir.

FP: Negatif örneğin yanlış sınıflandırılması işlemidir.

FN: Pozitif örneğin yanlış sınıflandırılması işlemidir.

Şekil 16'da verilen karışıklık matrisine göre; Doğruluk (Accuracy), Hassaslık (Precision), Duyarlılık (Recall) ve F-ölçüsü (F-measure) sırasıyla Eşitlik 1-4'e göre hesaplanmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (1)$$

$$\text{Hassaslık} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

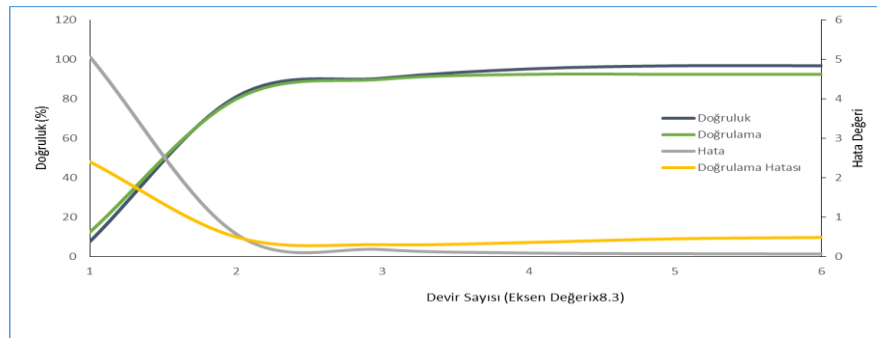
$$F - \text{Ölçüsü} = \frac{2 * \text{Duyarlılık} * \text{Hassaslık}}{\text{Duyarlılık} + \text{hassaslık}} \quad (4)$$

4.2. ESA Modellerin Eğitim ve Test Sonuçları (Training and Test Results of CNN Models)

Çalışmada 10 kat çapraz doğrulama kullanıldığı için her bir modelin eğitim ve test işlemi 10 defa gerçekleştirilmiştir. Her bir eğitim işleminde verilerin %90'ını eğitim, geriye kalan %10'unu test için kullanılmıştır. Modellerin eğitim aşamasında elde ettiği yakınsama grafikleri hep benzer sonuçlar verdiği için bu çalışmada sadece ilk eğitim sonucundaki grafikler verilmiştir. Benzer şekilde, her bir eğitimdeki test sonucunda elde edilen karışıklık matrisi (bütün modeller için toplam 40 matris) vermek yerine bunların toplamından oluşan karışıklık matrisi verilmiştir. Örneğin ESC10_ESA224 modeli on kez çalıştırılarak on farklı karışıklık matrisi elde edilmiştir. Bu on matris toplanarak tek bir matris haline getirilerek makalede sunulmuştur. Böylelikle her bir sesin eğitim sonucunda doğru sınıflandırılan örnek sayısı ile yanlış sınıflandırılan örnek sayısının toplamı elde edilmiştir. Bu matris üzerinden ortalama performans metrikleri hesaplanmıştır. Literatürde çalışmanın yapıldığı veri setleri de 10 kat çapraz doğrulama yapılacak şekilde hazırlandığından bu çalışmada da adil bir karşılaştırma için benzer şekilde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca derin öğrenmenin en popüler modellerinin giriş görüntü boyutu genellikle 224x224x3 olduğu için veri setleri bu boyutta elde edilmiştir. Bu boyuta ilaveten daha az veri ile daha yüksek doğruluk değerlerinin elde edilmesini araştırmak için ikinci bir boyut olarak 32x32x3 görüntü boyutu seçilmiştir. Bu görüntü boyutları üzerinde elde edilen sonuçları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

4.2.1. ESC10 veri setinde görüntü boyutu 32x32x3 için elde edilen sonuçlar (Results for image size 32x32x3 in ESC10 dataset)

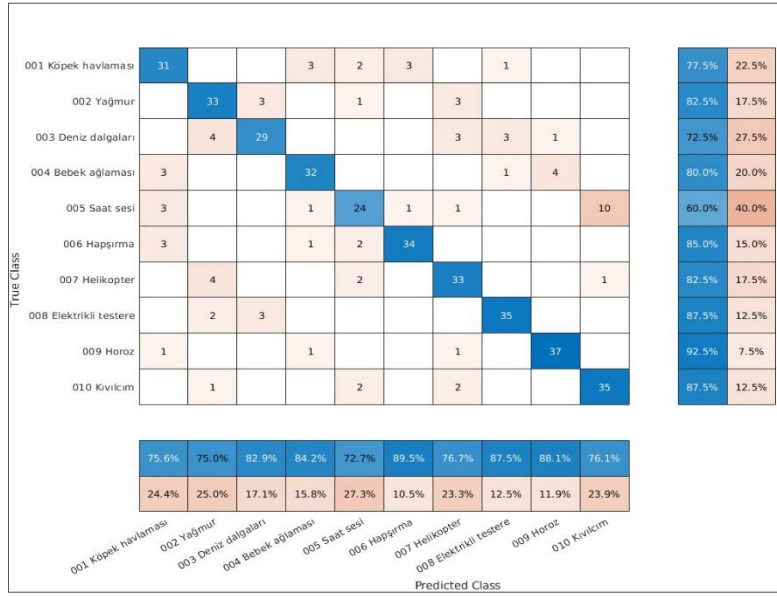
ESC10 veri seti üzerinde ESC10_ESA32 modelinin eğitim aşamasında ilk eğitim sonucunda elde ettiği yakınsama grafiği Şekil 17'de verilmiştir. Eğitim aşamasında her bir doğrulama sonucu elde edilen matrislerin toplamından elde edilen karışıklık matrisi ise Şekil 18'de sunulmuştur.



Şekil 17. ESC10_ESA32 modelinin eğitim aşamasındaki yakınsama grafiği

Figure 17. Convergence graph of ESC10_ESA32 model in training

Şekil 17'de modellerin eğitim esnasında ezberleme yapmadan daha iyi yakınsama gerçekleştirdikleri görülmüştür. ESC10_ESA32 modelinin 10-kat çapraz doğrulama sonucunda Şekil 18'de elde edilen karışıklık matrisine bakıldığında, ortalama doğruluk oranı %80.75'tir. En yüksek doğruluk sınıfının 40 doğrulama görüntüsünün 37 tanesini doğru etiketleyerek %92.50 başarı oranı elde edilen horoz sesi olduğu anlaşılmıştır. En düşük sınıflandırma ise %60 ile saat tik-tak sesi olduğu görülmüştür. Yapılan değerlendirmede en çok bu sınıfa ait kentsel sesin diğer ses sınıflarıyla karıştırıldığı anlaşılmıştır. Genel olarak ESC10_ESA32 modeli, saat tik-tok sesi, dalga sesi ve köpek havlama sesi dışındaki diğer sınıflarda %80 üzeri bir doğruluk oranı ile sınıflandırma işlemi yaptığı görülmüştür.

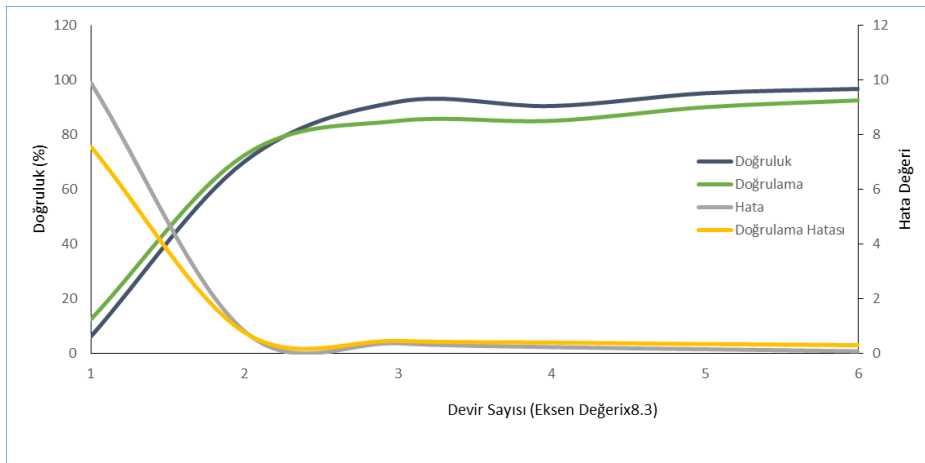


Şekil 18. ESC10_ESA32 modelinin eğitimindeki doğrulama verisinden elde edilen on matrisin toplamını ifade eden karışıklık matrisi. Bu modelin ortalama doğruluk değeri %80.75'tir.

Figure 18. Confusion matrix, which is the sum of the ten matrices obtained from the validation data in the training of the ESC10_ESA32 model. The average accuracy of this model is 80.75%

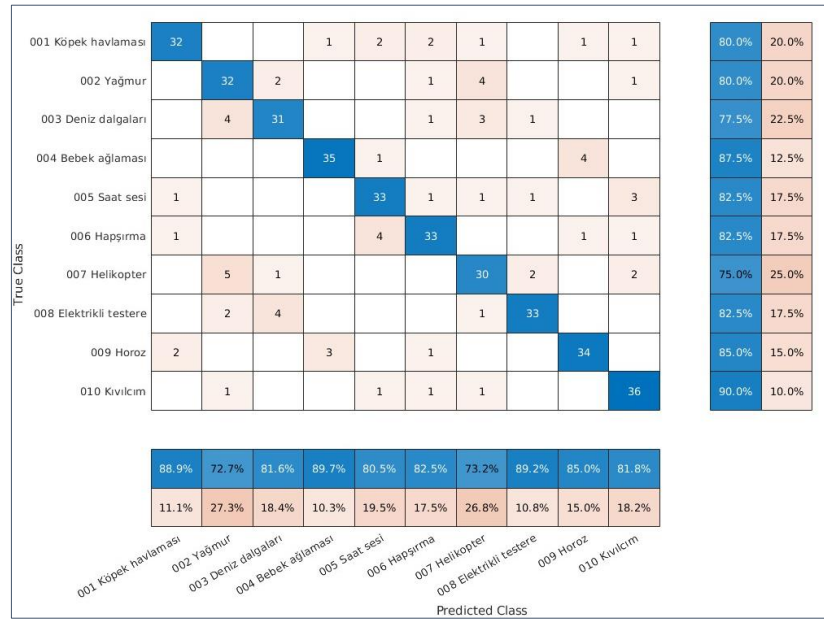
4.2.2. ESC10 veri setinde görüntü boyutu 224x224x3 için elde edilen sonuçlar (Results for image size 224x224x3 in ESC10 dataset)

ESC10 veri seti üzerinde ESC10_ESA224 modelinin eğitim aşamasında ilk eğitim sonucunda elde ettiği yakınsama grafiği Şekil 19'da verilmiştir. Şekil 19'a bakıldığında modellerin eğitim esnasında ezberleme yapmadan daha iyi yakınsama gerçekleştirdikleri görülmüştür. Eğitim aşamasında her bir doğrulama sonucunda elde edilen 10 matrisin toplamından elde edilen karışıklık matrisi ise Şekil 20'de verilmiştir. Bu matris üzerinden ortalama performans metrikleri hesaplanmıştır.



Şekil 19. ESC10_ESA224 modelinin eğitim aşamasındaki yakınsama grafiği

Figure 19. Convergence graph of ESC10_ESA224 model in training



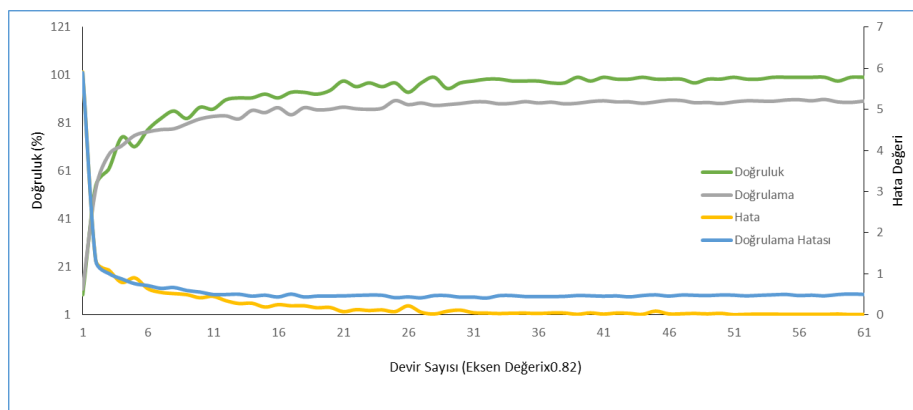
Şekil 20. ESC10_ESA224 modelinin eğitimindeki doğrulama verisinden elde edilen on matrisin toplamını ifade eden karışıklık matrisi. Bu modelin ortalama doğruluk değeri %82.25'tir.

Figure 20. Confusion matrix, which is the sum of the ten matrices obtained from the validation data in the training of the ESC10_ESA224 model. The average accuracy of this model is 82.25%.

Şekil 20'de gösterilen ESC10_ESA224 modelinin eğitim aşamasında her bir doğrulama sonucu elde edilen matrislerin toplamından elde edilen karışıklık matrisine bakıldığında, ortalama doğruluk oranı %82.25'tir. En yüksek doğruluk sınıfının 40 görüntününün 36 tanesini doğru etiketleyerek %90 başarı oranı elde edilen ateş kıvılcım sesi olduğu anlaşılmıştır. En düşük sınıflandırma ise %75 ile helikopter sesi olduğu görülmüştür. Yapılan değerlendirmede en çok bu sınıfa ait kentsel sesin diğer ses sınıflarıyla karıştırıldığı anlaşılmıştır. Genel olarak ESC10_ESA224 modeli, deniz dalgası ve helikopter sesi dışındaki diğer sınıflarda %80 üzeri bir doğruluk oranı ile sınıflandırma işlemi yaptığı görülmüştür.

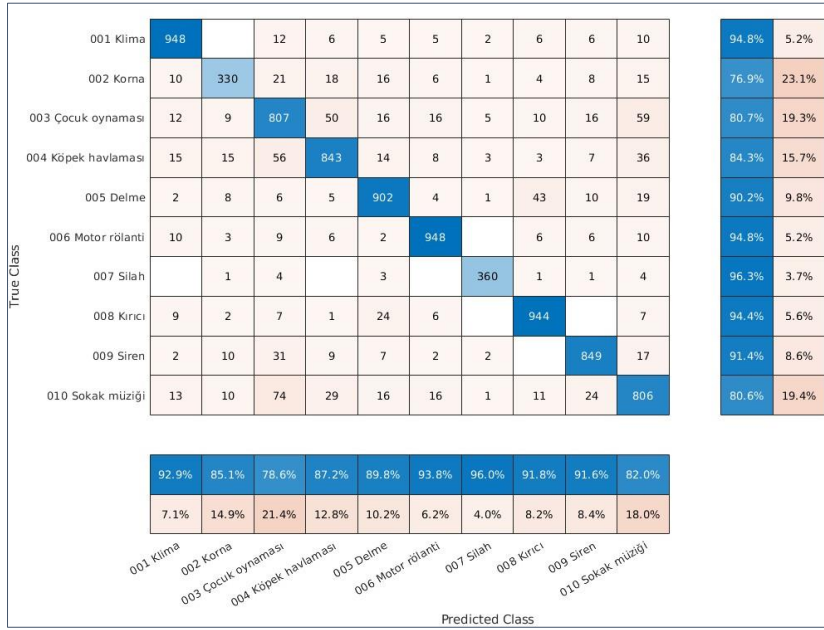
4.2.3. Urbansound8k veri setinde görüntü boyutu 32x32x3 için elde edilen sonuçlar (Results for image size 32x32x3 in Urbansound8k dataset)

UrbanSound8K veri seti üzerinde URBANSOUND8K_ESA32 modelinin eğitim aşamasında elde edilen yakınsama grafiği Şekil 21'de verilmiştir. 10 kat çaprazlama sonucunda elde edilen her bir matrisin toplamından elde edilen karışıklık matrisi ise Şekil 22'de sunulmuştur.



Şekil 21. URBANSOUND8K_ESA32 modelinin eğitim aşamasındaki yakınsama grafiği

Figure 21. Convergence graph of URBANSOUND8K_ESA32 model in training phase



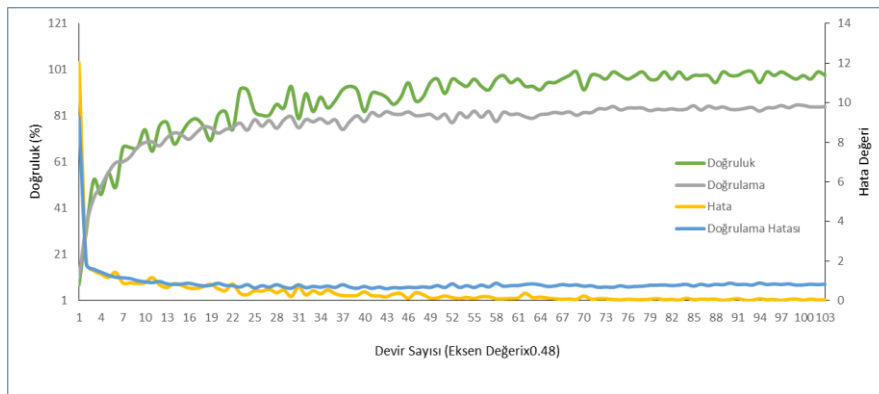
Şekil 22. URBANSOUND8K_ESA32 modelinin eğitimindeki doğrulama verisinden elde edilen on matrisin toplamını ifade eden karışıklık matrisi. Bu modelin ortalama doğruluk değeri %88.60'tir.

Figure 22. Confusion matrix, which is the sum of the ten matrices obtained from the validation data in the training of the URBANSOUND8K_ESA32 model. The average accuracy of this model is 88.60%

URBANSOUND8K_ESA32 modelinin Şekil 22'de elde edilen karışıklık matrisine bakıldığında, ortalama doğruluk oranı %88.60 olarak elde edilmiştir. En yüksek doğruluk sınıfının 374 görüntününün 360 tanesini doğru etiketleyerek %96.30 başarı oranı elde edilen silah atış sesi olduğu anlaşılmıştır. En düşük sınıflandırma ise %76.90 ile araç korna sesi olduğu görülmüştür. Yapılan değerlendirmede en çok bu sınıfa ait kentsel sesin diğer ses sınıflarıyla karıştırdığı anlaşılmıştır. Genel olarak URBANSOUND8K_ESA32 modeli, araç korna sesi dışındaki diğer sınıflarda %80 üzeri bir doğruluk oranı ile sınıflandırma işlemi yaptığı görülmüştür.

4.2.4. Urbansound8k veri setinde görüntü boyutu 224x224x3 için elde edilen sonuçlar (Results for image size 224x224x3 in Urbansound8k dataset)

UrbanSound8K veri seti üzerinde URBANSOUND8K_ESA224 modelinin eğitim aşamasında elde edilen yakınsama grafiği Şekil 23'te ve 10 kat çaprazlama sonucunda elde edilen matrislerin toplamını ifade eden karışıklık matrisi ise Şekil 24'te verilmiştir.



Şekil 23. URBANSOUND8K_ESA224 modelinin eğitim aşamasındaki yakınsama grafiği

Figure 23. Convergence graph of URBANSOUND8K_ESA224 model in training phase

True Class	001 Klima	002 Korna	003 Çocuk oynaması	004 Köpek havlaması	005 Delme	006 Motor rörlenti	007 Silah	008 Kırıcı	009 Siren	010 Sokak müziği		
001 Klima	900	3	29	7	9	22	1	8	10	11	90.0%	10.0%
002 Korna	5	295	23	19	19	8	1	8	18	33	68.8%	31.2%
003 Çocuk oynaması	19	8	728	72	16	12	3	13	27	102	72.8%	27.2%
004 Köpek havlaması	18	25	64	816	8	8	4	6	18	33	81.6%	18.4%
005 Delme	11	6	8	7	882	4	6	48	10	18	88.2%	11.8%
006 Motor rörlenti	15	4	17	7	7	920		9	8	13	92.0%	8.0%
007 Silah		1	2	5	1		360	1	2	2	96.3%	3.7%
008 Kırıcı	9	2	13		39	17		915		5	91.5%	8.5%
009 Siren	8	19	42	8	7	10		6	804	25	86.5%	13.5%
010 Sokak müziği	19	23	119	21	16	13		14	31	744	74.4%	25.6%

Predicted Class	001 Klima	002 Korna	003 Çocuk oynaması	004 Köpek havlaması	005 Delme	006 Motor rörlenti	007 Silah	008 Kırıcı	009 Siren	010 Sokak müziği
001 Klima	89.6%	76.4%	69.7%	84.8%	87.8%	90.7%	96.0%	89.0%	86.6%	75.5%
002 Korna	10.4%	23.6%	30.3%	15.2%	12.2%	9.3%	4.0%	11.0%	13.4%	24.5%

Şekil 24. URBANSOUND8K_ESA224 modelinin eğitimindeki doğrulama verisinden elde edilen on matrisin toplamını ifade eden karışıklık matrisi. Bu modelin ortalama doğruluk değeri %84.33'tür

Figure 24. Confusion matrix, which is the sum of the ten matrices obtained from the validation data in the training of the URBANSOUND8K_ESA224 model. The average accuracy of this model is 84.33%.

URBANSOUND8K_ESA224 modelinin Şekil 24'te elde edilen ortalama doğruluk oranına sahip karışıklık matrisine bakıldığında, ortalama doğruluk oranı %84.33 olduğu ve en yüksek doğruluk sınıfının 374 görüntününün 360 tanesini doğru etiketleyerek %96.30 başarı oranı elde edilen silah atış sesi olduğu anlaşılmıştır. En düşük sınıflandırma ise %68.80 ile araç korna sesi olduğu görülmüştür. Yapılan değerlendirmede en çok bu sınıfa ait kentsel seslerin diğer ses sınıflarıyla karıştırıldığı anlaşılmıştır. Genel olarak URBANSOUND8K_ESA224 modeli, araç korna sesi, oyun oynayan çocuk sesleri ve sokak müzik sesleri dışındaki diğer sınıflarda %80 üzeri bir doğruluk oranı ile sınıflandırma işlemi yaptığı görülmüştür.

Çalışmada tasarlanan dört farklı ESA modelinin farklı görüntü boyutuna sahip veri setleri üzerinde elde ettiği performans metriklerinin ortalama sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelgeye göre ESC10 veri seti için en yüksek doğruluk, Hassaslık, Duyarlılık ve F ölçüsü değerleri sırasıyla %82.25, %82.25, %82.51 ve %82.30 olarak elde edilmiştir. Urbansound8K veri setinde ise bu oranlar sırasıyla %88.61, %88.44, %88.86 ve %88.62 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 6. Önerilen modellerin elde ettiği performans metriklerinin ortalama değerleri (%)

Table 6. Average values of performance metrics obtained by the proposed models (%)

Önerilen Model Adı	Doğruluk	Hassaslık	Duyarlılık	F Ölçüsü
ESC10_ESA32	80.75	80.75	80.83	80.61
ESC10_ESA224	82.25	82.25	82.51	82.30
URBANSOUND8K_ESA32	88.61	88.44	88.86	88.62
URBANSOUND8K_ESA224	84.33	84.21	84.62	84.39

4.4. Diğer Çalışmalar ile Karşılaştırılması (Comparison with Other Studies)

Çevresel seslerin sınıflandırılması ile ilgili literatürde birden fazla çalışmanın olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri setleri üzerinde yapılan çalışmalar çizelgeler halinde verilmiştir. Çizelgelerdeki çalışmalarda, geliştirilen modeller 224x224x3 giriş görüntü boyutuna sahip modellerdir. Çizelge 7'de ESC10 veri seti üzerinde yapılan bazı çalışmalar gösterilmiştir. Çizelge 7'e bakıldığında

önerilen yöntemin diğerlerinden daha başarılı olduğu görülmektedir. UrbanSound8K veri seti için geliştirilen modelin literatürdeki diğer modellerle karşılaştırılması Çizelge 8'de verilmiştir. Çizelge 8'e bakıldığında önerilen modelin diğer modellerden çok daha başarılı olduğu görülmektedir.

Çizelge 7. ESC10 veri seti üzerinde yapılan çalışmaların karşılaştırılması

Table 7. Comparison of studies on ESC10 dataset

Çalışmayı Yapanlar - Referans	Kullanılan Yöntem	Doğruluk (%)
Karol J. Piczak - [26]	SVM	80
Pillos ve ark. - [50]	Random Forest Multi-Layer	74.5
Su ve ark. - [32]	MC-Net	72
Salamon ve Bello - [27]	SB-ConvNets	72
Salamon ve Bello - [20]	Spherical k-means	74
Zhu ve ark.	Multitemp	74
Karol J. Piczak - [26]	ESA	80.5
Karol J. Piczak - [47]	Ensemble (Random forest)	72.7
Khamparia ve ark. - [51]	Spectrogram Images (ESA + TDSN)	56.0
Önerilen Model (ESC10_ESA224)	ESA	82.25

Çizelge 8. UrbanSound8K veri seti üzerinde yapılan çalışmaların karşılaştırılması

Table 8. Comparison of studies on UrbanSound8K dataset

Çalışmayı Yapanlar - Referans	Kullanılan Yöntem	Doğruluk Değeri (%)
Yan Chen ve ark. - [35]	Dilated convolution	%78
Karol J. Piczak - [26]	Convolutional layers with max-pooling	%74
Justin Salamon ve Juan Pablo Bello - [52]	Unsupervised feature learning	%73.6
Nelauzjon Maxudoy ve ark. - [53]	Long segments/majority voting	%71.8
Justin Salamon ve ark. - [41]	Baseline system	%68
Karol J. Piczak - [26]	ESA	73.7
İnik ve Şeker - [54]	ESA	82.5
Önerilen Model (URBANSOUND_ESA32)	ESA	88.60

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan çalışmada iki farklı ÇSS veri setinin sınıflandırılması için özgün derin öğrenme mimarileri geliştirilmiştir. Bu veri setleri sırasıyla ESC10 ve UrbanSound8K veri setleridir. Bu veri setleri literatürde ÇSS için iyi oluşturulmuş araştırma veri setleridir. Bu veri setlerindeki çevresel sesler sinyal formatından görüntü formatına dönüştürülmüştür. Bu verilerden 32x32x3 ve 224x224x3 boyutlarında iki farklı veri seti için toplamda dört veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setleri için ESC10_ESA32, ESC10_ESA224, URBANSOUND8K_ESA32 ve URBANSOUND8K_ESA224 adında ESA modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller 10-kat çapraz doğrulama yapılarak veri setleri ile eğitilmiştir.

ESC10_ESA32 modeli ortalama doğruluk oranı %80.75 olarak elde edilmiştir. Bu modelin elde ettiği en yüksek doğruluk oranı %92.50 ile horoz sesi sınıfı iken en düşük oranı %60 ile saat sesi olmuştur. ESC10_ESA224 modelinin elde ettiği ortalama doğruluk oranı %82.25'dir. Bu model kıvılcım seslerini %90 başarı ile en yüksek doğruluk oranı ile sınıflandırmasına karşın %75 ile helikopter sesini en düşük doğruluk oranında yapmıştır. Yapılan değerlendirmede ESC10 veri seti üzerinde giriş görüntü boyutunun 224x224x3 olması doğruluk oranını artırdığı görülmüştür. URBANSOUND8K_ESA32 modelinin elde ettiği ortalama doğruluk değeri %88.60 olmuştur. Bu model silah sesini %96.30'luk bir doğruluk oranı ile

en yüksek seviyede sınıflandırmıştır. Korna sınıfını ise en %76.90 gibi düşük oranda sınıflandırmıştır. URBANSOUND8K_ESA224 modelinin elde ettiği ortalama doğruluk oranı ise %84.33 olduğu görülmüştür. Bu model en yüksek doğruluk oranını %96.30 ile silah sınıfında en düşük %68.8 oranında korna sınıfında elde etmiştir. ESC10 veri setinden farklı olarak UrbanSound8K veri setinde giriş görüntü boyutu düşük olan model daha yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Bu çalışmanın yazarları olarak tüm etik standartlara uyulduğunu bildiririz.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Yalçın Dinçer: Kavramsallaştırma, Yazılım, Veri düzenleme, Yazım- Orijinal taslak hazırlama. Görselleştirme, Araştırma. **Özkan İnik:** Danışmanlık, Yazılım, Metodoloji, Gözden Geçirme ve Düzenleme, Doğrulama, Görselleştirme.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışma herhangi bir destek almamıştır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Chu, S. Narayanan, and C.-C. J. Kuo, "Environmental sound recognition with time–frequency audio features," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 17, pp. 1142–1158, 2009.
- [2] F. Demir, M. Turkoglu, M. Aslan, and A. Sengur, "A new pyramidal concatenated CNN approach for environmental sound classification," *Applied Acoustics*, vol. 170, p. 107520, 2020.
- [3] P. Aumond, C. Lavandier, C. Ribeiro, E. G. Boix, K. Kamboja, E. D'Hondt, et al., "A study of the accuracy of mobile technology for measuring urban noise pollution in large scale participatory sensing campaigns," *Applied Acoustics*, vol. 117, pp. 219–226, 2017.
- [4] J. Cao, M. Cao, J. Wang, C. Yin, D. Wang, and P.-P. Vidal, "Urban noise recognition with convolutional neural network," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, pp. 29021–29041, 2019.
- [5] R. Radhakrishnan, A. Divakaran, and A. Smaragdis, "Audio analysis for surveillance applications," in *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 2005., 2005, pp. 158–161.
- [6] M. Crocco, M. Cristani, A. Trucco, and V. Murino, "Audio surveillance: A systematic review," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 48, pp. 1–46, 2016.
- [7] P. Laffitte, Y. Wang, D. Sodoyer, and L. Girin, "Assessing the performances of different neural network architectures for the detection of screams and shouts in public transportation," *Expert systems with applications*, vol. 117, pp. 29–41, 2019.

- [8] H. Li, S. Ishikawa, Q. Zhao, M. Ebana, H. Yamamoto, and J. Huang, "Robot navigation and sound based position identification," in 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2007, pp. 2449-2454.
- [9] R. F. Lyon, "Machine hearing: An emerging field [exploratory dsp]," *IEEE signal processing magazine*, vol. 27, pp. 131-139, 2010.
- [10] S. Chu, S. Narayanan, C.-C. J. Kuo, and M. J. Mataric, "Where am I? Scene recognition for mobile robots using audio features," in 2006 IEEE International conference on multimedia and expo, 2006, pp. 885-888.
- [11] J. Huang, "Spatial auditory processing for a hearing robot," in *Proceedings. IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2002*, pp. 253-256.
- [12] M. Green and D. Murphy, "Environmental sound monitoring using machine learning on mobile devices," *Applied Acoustics*, vol. 159, p. 107041, 2020.
- [13] P. Intani and T. Orachon, "Crime warning system using image and sound processing," in 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), 2013, pp. 1751-1753.
- [14] A. Agha, R. Ranjan, and W.-S. Gan, "Noisy vehicle surveillance camera: A system to deter noisy vehicle in smart city," *Applied Acoustics*, vol. 117, pp. 236-245, 2017.
- [15] S. Ntalampiras, "Universal background modeling for acoustic surveillance of urban traffic," *Digital Signal Processing*, vol. 31, pp. 69-78, 2014.
- [16] V. Bisot, R. Serizel, S. Essid, and G. Richard, "Feature learning with matrix factorization applied to acoustic scene classification," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 25, pp. 1216-1229, 2017.
- [17] D. Stowell, D. Giannoulis, E. Benetos, M. Lagrange, and M. D. Plumbley, "Detection and classification of acoustic scenes and events," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 17, pp. 1733-1746, 2015.
- [18] P. Dhanalakshmi, S. Palanivel, and V. Ramalingam, "Classification of audio signals using AANN and GMM," *Applied soft computing*, vol. 11, pp. 716-723, 2011.
- [19] J. Ludena-Choez and A. Gallardo-Antolin, "Acoustic Event Classification using spectral band selection and Non-Negative Matrix Factorization-based features," *Expert Systems with Applications*, vol. 46, pp. 77-86, 2016.
- [20] J. Salamon and J. P. Bello, "Unsupervised feature learning for urban sound classification," in 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015, pp. 171-175.
- [21] J. T. Geiger and K. Helwani, "Improving event detection for audio surveillance using gabor filterbank features," in 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2015, pp. 714-718.
- [22] M. Mulimani and S. G. Koolagudi, "Segmentation and characterization of acoustic event spectrograms using singular value decomposition," *Expert Systems with Applications*, vol. 120, pp. 413-425, 2019.
- [23] J. Xie and M. Zhu, "Investigation of acoustic and visual features for acoustic scene classification," *Expert Systems with Applications*, vol. 126, pp. 20-29, 2019.
- [24] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks," in *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 1097-1105.
- [25] J. Deng, A. Berg, S. Satheesh, H. Su, A. Khosla, and L. Fei-Fei, "Imagenet large scale visual recognition competition 2012 (ILSVRC2012)," [See net. org/challenges/LSVRC](http://see.net.org/challenges/LSVRC), p. 41, 2012.
- [26] K. J. Piczak, "Environmental sound classification with convolutional neural networks," in 2015 IEEE 25th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), 2015, pp. 1-6.
- [27] J. Salamon and J. P. Bello, "Deep convolutional neural networks and data augmentation for environmental sound classification," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, pp. 279-283, 2017.

- [28] N. Takahashi, M. Gygli, B. Pfister, and L. Van Gool, "Deep convolutional neural networks and data augmentation for acoustic event detection," arXiv preprint arXiv:1604.07160, 2016.
- [29] Y. Tokozume, Y. Ushiku, and T. Harada, "Learning from between-class examples for deep sound recognition," arXiv preprint arXiv:1711.10282, 2017.
- [30] V. Boddapati, A. Petef, J. Rasmusson, and L. Lundberg, "Classifying environmental sounds using image recognition networks," *Procedia computer science*, vol. 112, pp. 2048-2056, 2017.
- [31] S. Li, Y. Yao, J. Hu, G. Liu, X. Yao, and J. Hu, "An ensemble stacked convolutional neural network model for environmental event sound recognition," *Applied Sciences*, vol. 8, p. 1152, 2018.
- [32] Y. Su, K. Zhang, J. Wang, and K. Madani, "Environment sound classification using a two-stream CNN based on decision-level fusion," *Sensors*, vol. 19, p. 1733, 2019.
- [33] Z. Mushtaq and S.-F. Su, "Environmental sound classification using a regularized deep convolutional neural network with data augmentation," *Applied Acoustics*, vol. 167, p. 107389, 2020.
- [34] Z. Mushtaq, S.-F. Su, and Q.-V. Tran, "Spectral images based environmental sound classification using CNN with meaningful data augmentation," *Applied Acoustics*, vol. 172, p. 107581, 2021.
- [35] Y. Chen, Q. Guo, X. Liang, J. Wang, and Y. Qian, "Environmental sound classification with dilated convolutions," *Applied Acoustics*, vol. 148, pp. 123-132, 2019.
- [36] S. Abdoli, P. Cardinal, and A. L. Koerich, "End-to-end environmental sound classification using a 1D convolutional neural network," *Expert Systems with Applications*, vol. 136, pp. 252-263, 2019.
- [37] F. Medhat, D. Chesmore, and J. Robinson, "Masked Conditional Neural Networks for sound classification," *Applied Soft Computing*, vol. 90, p. 106073, 2020.
- [38] X. Zhang, Y. Zou, and W. Shi, "Dilated convolution neural network with LeakyReLU for environmental sound classification," in *2017 22nd International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, 2017, pp. 1-5.
- [39] M. Lim, D. Lee, H. Park, Y. Kang, J. Oh, J.-S. Park, et al., "Convolutional Neural Network based Audio Event Classification," *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, vol. 12, 2018.
- [40] E. Akbal, "An automated environmental sound classification methods based on statistical and textural feature," *Applied Acoustics*, vol. 167, p. 107413, 2020.
- [41] J. Salamon, C. Jacoby, and J. P. Bello, "A dataset and taxonomy for urban sound research," in *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia*, 2014, pp. 1041-1044.
- [42] M. Lim, D. Lee, H. Park, Y. Kang, J. Oh, J.-S. Park, et al., "Convolutional neural network based audio event classification," *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, vol. 12, pp. 2748-2760, 2018.
- [43] A. Mesaros, T. Heittola, and T. Virtanen, "TUT database for acoustic scene classification and sound event detection," in *2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2016, pp. 1128-1132.
- [44] Ö. İnik, "CNN hyper-parameter optimization for environmental sound classification," *Applied Acoustics*, vol. 202, p. 109168, 2023.
- [45] Ö. İnik and E. Ülker, "Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri," *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, vol. 6, pp. 85-104, 2017.
- [46] D. Dev, *Deep learning with hadoop*: Packt Publishing Ltd, 2017.
- [47] K. J. Piczak, "ESC: Dataset for environmental sound classification," in *Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia*, 2015, pp. 1015-1018.
- [48] C. Sammut and G. I. Webb, *Encyclopedia of machine learning*: Springer Science & Business Media, 2011.
- [49] X. Deng, Q. Liu, Y. Deng, and S. Mahadevan, "An improved method to construct basic probability assignment based on the confusion matrix for classification problem," *Information Sciences*, vol. 340, pp. 250-261, 2016.

- [50] A. Pillos, K. Alghamidi, N. Alzamel, V. Pavlov, and S. Machanavajhala, "A real-time environmental sound recognition system for the Android OS," *Proceedings of Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events*, 2016.
- [51] A. Khamparia, D. Gupta, N. G. Nguyen, A. Khanna, B. Pandey, and P. Tiwari, "Sound classification using convolutional neural network and tensor deep stacking network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 7717-7727, 2019.
- [52] V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, "Segnet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 39, pp. 2481-2495, 2017.
- [53] N. Maxudov, B. Özcan, and M. F. Kırac, "Scene recognition with majority voting among subsection levels," in *2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, 2016, pp. 1637-1640.
- [54] H. Seker and O. Inik, "CnnSound: Convolutional Neural Networks for the Classification of Environmental Sounds," in *2020 The 4th International Conference on Advances in Artificial Intelligence*, 2020, pp. 79-84.



KONVEKTİF VE MODİFİYE EDİLEN SICAKLIK KONTROLLÜ BİR MİKRODALGA FIRINDA KURUTULAN IHLAMURUN BAZI FİZİKO-KİMYASAL ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI

¹Muhammed TAŞOVA , ¹Hakan POLATCI 

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tokat, TÜRKİYE
¹muhammed.tasova@gop.edu.tr, ²hakan.polatci@gop.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Modifiye edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucunun performansı araştırılmıştır.
- Ihlamurun kalite özelliklerine kurutma yöntemlerinin etkisi incelenmiştir.
- Enerji analizlerine kurutma işlemlerinin etkisi belirlenmiştir.



KONVEKTİF VE MODİFİYE EDİLEN SICAKLIK KONTROLLÜ BİR MİKRODALGA FIRINDA KURUTULAN İHLAMURUN BAZI FİZİKO-KİMYASAL ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI

¹Muhammed TAŞOVA , ¹Hakan POLATCI 

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tokat, TÜRKİYE
¹muhammed.tasova@gop.edu.tr, ²hakan.polatci@gop.edu.tr

(Geliş/Received:16.12.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 30.03.2023)

ÖZ: İhlamur, yapısındaki önemli biyoaktif maddelerden (antioksidan, fenolik bileşikler) dolayı sağlık açısından önemli bir türdür. Kurutulduktan sonra özellikle çay olarak tüketimi oldukça yaygındır. Bu çalışmada, konvektif (KK) ve modifiye sıcaklık kontrollü mikrodalga (SKM) kurutma fırınında 40, 45 ve 50 °C sıcaklıklarında ıhlamur kurutulmuştur. Kurutma işlemlerinde ıhlamur örnekleri 3.21±0.19 nem değerinden 0.12±0.02 g nem/g kuru madde nem değerine kadar kurutulmuştur. KK işleminde belirtilen sıcaklıklar için ıhlamur örnekleri sırasıyla 23.5, 15 ve 8.5 saatte kurumıştır. SKM işleminde ise belirtilen sıcaklıklar için sırasıyla 8.25, 3.75 ve 2.25 saatte kurumıştır. KK yönteminde tespit edilen ortalama kuruma oranı değerleri 0.004025-0.008274 g nem/g kuru madde.dakika, SKM yönteminde ise ortalama 0.006178-0.0228 g nem/g kuru madde.dakika değerleri arasında değişmiştir. Efektif difüzyon değerleri KK işleminde 1.46×10^{-5} - 6.02×10^{-6} m²/s arasında, SKM işleminde ise bu değer 1.06×10^{-6} - 2.35×10^{-7} m²/s arasında değiştiği belirlenmiştir. Aktivasyon enerji değerleri KK ve SKM işlemleri için sırasıyla 74.50 ve 122.47 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Renk kalitesi açısından en uygun (p<0.05) kurutma işlemi olarak SKM yöntemi tespit edilmiştir. KK ve SKM yöntemlerinde buharlaşma enerji değerleri sırasıyla 0.6998-0.8312 ve 0.5267-0.6497 kWh değerleri arasında değişmiştir. Bu çalışmada ıhlamurun kuruma kinetiği, renk kalitesi ve buharlaşma enerji parametreleri açısından kurutma yöntemi olarak modifiye edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga (SKM) önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma İşlemleri, Mikrodalga Kurutma, Kuruma Kinetiği, Efektif Difüzyon-Aktivasyon Enerji, Kalite Özelliği, Buharlaşma Enerjisi

Investigation of Some Physio-Chemical Properties of Lime Dry in a Convective and Modified Temperature Controlled Microwave Oven

ABSTRACT: Linden is an important species for health due to the important bioactive substances (antioxidant, phenolic compounds) in its structure. After drying, it is widely consumed, especially as tea. In this study, linden was dried at 40, 45 and 50 °C temperatures in a convective (CD) and modified temperature controlled microwave (TCM) drying oven. In the drying processes, linden samples were dried from a moisture value of 3.21±0.19 to 0.12±0.02 g moisture/g dry matter moisture value. For the temperatures specified in the CD process, the linden samples were dried in 23.5, 15 and 8.5 hours, respectively. In the TCM process, it dried in 8.25, 3.75 and 2.25 hours, respectively, for the specified temperatures. The average drying rate values determined in the CD method ranged from 0.004025-0.008274 g moisture/g dry matter.minute, and in the TCM method, the average values between 0.006178-0.0228 g moisture/g dry matter.minute. It was determined that the effective diffusion values changed between 1.46×10^{-5} - 6.02×10^{-6} m²/s in the CD process and between 1.06×10^{-6} - 2.35×10^{-7} m²/s in the TCM process. Activation energy values were calculated as 74.50 and 122.47 kJ/mol for CD and TCM processes, respectively. TCM method was determined as the most suitable (p<0.05) drying process in terms of color quality. Evaporation energy values in the CD and TCM methods varied between 0.6998-0.8312 and 0.5267-0.6497 kWh, respectively. In this study, a modified temperature controlled microwave (TCM)

drying method is recommended in terms of drying kinetics, color quality and evaporation energy parameters of linden.

Keywords: *Drying Processes, Microwave Drying, Drying Kinetics, Effective Diffusion-Activation Energy, Quality Property, Evaporation Energy*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Aromatik bitkiler yapılarındaki biyoaktif maddelerden dolayı sağlık problemlerinin iyileşmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Son yıllarda tüketimi artan aromatik bitkileri ülkelerin tarım sektöründe önemli gelir kaynakları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte FAO (Gıda ve Tarım Örgütü) raporuna göre üretilen ilaçların ortalama % 30'unda tıbbi/aromatik bitkilerden üretilen bileşiklerin olduğu bildirilmiştir [13-6]. Comtrade [7] ve TÜİK [30], yılı verilerine göre Dünya toplam aromatik bitki ihracat değerinin 207.475.944 dolar ithalat değerinin ise 205.887.100 dolar olduğunu bildirmişlerdir. Dünya'da bulunan 250.000 damarlı bitki türünün yaklaşık 85.000' inin tıbbi özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Türkiye'de ise 500' ü tıbbi ve aromatik özellikte olduğu ve bu değer 200' ünün ticari potansiyeli olduğu belirtilmiştir [6]. Aromatik bitkilerden birisi de kurutulduktan sonra çayı demlenerek tüketilen ve analjezik, sakinleştirici etkisi olan ıhlamur (*Tilia platyphyllos* Scop.) bitkisidir [32]. Ihlamur yapısında bulunan fenolik bileşikler, flavanoid maddelerinden dolayı ısıl reaksiyonlardan çok fazla etkilenmektedir [23]. Kurutma şartlarının iyi belirlenmemesi enzimatik olmayan renk kayıplarını meydana getirmektedir. Bu durum ticari değerini ciddi oranda azaltmaktadır.

Kurutma termal işlemle ürünlerdeki nem içeriğinin azaltılması işlemidir. Buradaki temel amaç, oksidatif ve enzimatik reaksiyonlarla gerçekleşebilecek bozulmaların engellenmesi ve ürünün tat, aroma ve renk özelliklerinin korunmasıdır [5]. Bu amacı gerçekleştirirken uygulanan bir çok kurutma yöntemi vardır. En eski bilineni açıkta güneş ya da gölge ortamına serilerek yapılan kurutma şeklidir. Bu yöntem ucuz ve pratik olmasına rağmen kuruma süresinin çok uzun olması, homojen nem içeriğine sahip olmayan son kuru ürün eldesi, çevre koşullarından olumsuz etkilenme (hijyen olmayan durumlar) gibi olumsuz yönleri vardır [9]. Açıkta yapılan kurutma işlemlerinde nitel ve nicel kayıp oranı yaklaşık % 30-40 oranında olduğu bildirilmiştir [4]. Açıkta kurutma işlemlerinde karşılaşılan sorunları azaltmak için yapay kurutucular daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Bu sebeple kurutma endüstrisinde en yaygın kullanılan kurutma yöntemlerinden biriside konvektif sıcak havalı ve mikrodalga kurutuculardır [27]. Konvektif sıcak havalı kurutma işleminde açıkta kurutmaya göre kuruma süresi daha kısa olmakta, güvenli depo edilebilir nem değerine daha kolay düşürülebilmekte ve ürünün son kalite değerlerinde daha iyi sonuçlar alınmaktadır. Ancak mikrodalga kurutuculara göre termal iletkenliği daha düşüktür. Bu durum kuruma süresini uzatmaktadır [11]. Mikrodalga kurutma işlemlerinde ise sıcaklık ürünün iç kısmından dış kısmına doğru olduğu için enerji ve ısı dağılımı konvektif kurutuculara göre daha uniform olmaktadır. Bunun yanında enerji tüketimi ve suda çözünebilir kuru madde kayıpları konvektif kurutuculara göre daha az seviyede kalmaktadır [12]. Fakat mikrodalga kurutma işlemlerinde güç (W) değeri ayarlanarak çalıştığı için üründe oluşturduğu sıcaklık değerleri yüksek olmaktadır. Bu durum renk kayıplarına ve ürün yüzeyindeki keskin köşelerde yanmalara sebebiyet vermektedir. Bu sebeple çalışmanın amacı imal edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucunun performansını kurutulan ürün açısından test etmek ve kurutma işlemlerin ıhlamurun kuruma, buharlaşma enerjisi ve kalite özelliklerine etkisi araştırılarak literatüre katkı sağlamaktır.

Bu çalışmada, ıhlamur sıcak havalı konvektif kurutucu ve sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucuda (40, 45, 50 °C) kurutarak ürünün; (1) kuruma-nem oranları, (2) efektif difüzyon-aktivasyon enerjisi, (3) kuruma modeli, (4) buharlaşma enerjisi, (5) renk değerleri tespit edilmiştir.

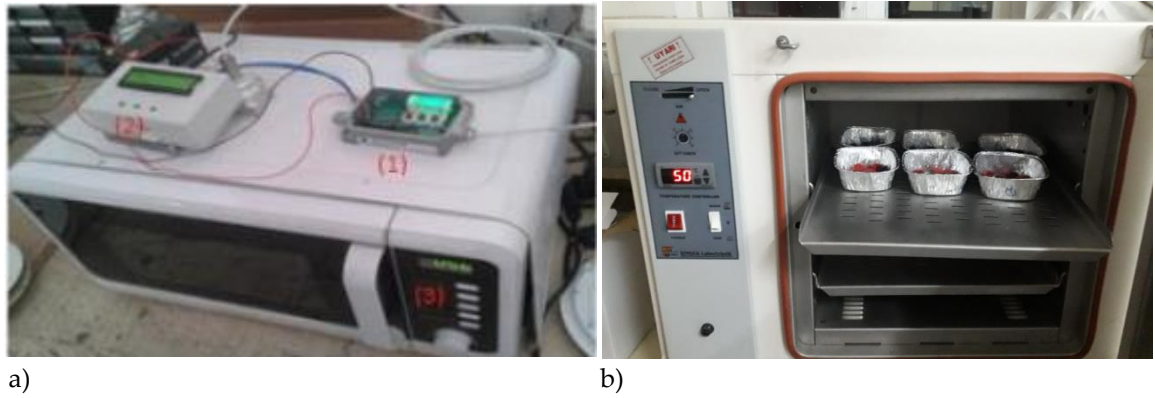
2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Çalışma kapsamında kullanılan ıhlamurlar Tokat Gaziosmanapaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi bahçesinde bulunan ağaçlardan haziran ayında hasat edilmiştir. Ihlamur yığınındaki yaprak, dal gibi yabancı materyaller ayıklandıktan sonra nem kaybetmemesi için iki gün boyunca buzdolabı koşullarında $+4\pm 0.5$ °C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir.

2.2. Kurutma Cihazları (Drying Devices)

Ihlamurların kurutulması için Şimşek laborteknik marka-ST-055 model sıcak havalı kovektif kurutucu kullanılmıştır. Kurutulan örneklerin ağırlık değişimini takip etmek için AND marka GF-300 model hassas terazi (0.01 g) kullanılmıştır. Mikrodalga kurutucu ise sıcaklık kontrollü olup kurutulan ürün yüzündeki oluşan sıcaklık değerini ölçme prensibi ile çalışmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Kurutucular; a) Modifiye edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga, b) konvektif

Figure 1. Dryers; a) Modified temperature-controlled microwave, b) convective

Kenwood marka 13J28 model mikrodalga fırın üzerine teknik özellikler dikkate alınarak Optris marka temassız kızıl ötesi sıcaklık sensörü monte edilmiştir. Mikrodalga fırın içerisinde yer alan kurutma materyali dönen bir cam tepsi üzerine konularak kurutulmuştur. Kullanılan mikrodalga fırın 230 V, 50 Hz, 800 W teknik özelliklere sahiptir. Bunun yanında 2450 MHz özelliğine sahiptir. Kurutma materyalinin yüzey sıcaklığı temassız kızılötesi sıcaklık sensörü (1) ile ölçülmektedir. Ölçülen değerler kontrol paneline (2) iletilmektedir. Ürünün yüzey sıcaklığı kontrol panelinde ayarlanan kurutma sıcaklığına ulaştığında mikrodalga fırın otomatik olarak durmakta ve kontrol panelinde ön denemede belirlenen dinlenme süresi kadar beklemektedir. Ürün sıcaklığı 15 saniye dinlenme süresi sonunda belirlenen kurutma sıcaklığının altına düştüğünde (± 2 °C) mikrodalga fırın (3) tekrar otomatik olarak çalışmaya başlamaktadır. Eğer bu süre içerisinde ürün sıcaklığı kurutma sıcaklığının alt değerine düşmediği durumda belirlenen süre kadar daha kurutucu çalışmadan beklemektedir. Ürünün nem içeriği % 10 (y.b.) seviyesine kadar 15'er dakika süre aralıklarında fırından çıkartılıp tartılmıştır. Kurutma işlemi, ürün nem içeriği belirlenen kritik nem değerine düşene kadar bu şekilde devam etmektedir [29-22].

2.3. Ürün Nem İçeriği (Product Moisture Content)

Ürünün nem tayinini belirlemek için 70 °C sıcaklığa ayarlanmış [15], fırında (Şimşek laborteknik marka-ST-055 model) ağırlık değişimi sabitlenene kadar kurutulmuştur. Ihlamurun ilk nem içeriği yaş baza (y.b.) göre belirlenmesi için 1 numaralı eşitlik kullanılmıştır [33].

$$N_{wb} = \frac{M_i \times M_t}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

Burada: M_i ; İlk ağırlık (g), M_t ; son ağırlık (g).

2.4. Kuruma Oranı (DR) (Dry Ratio)

İhlamur örneklerinin kurutma oranlarının belirlenmesi için 2 numaralı eşitlik kullanılmıştır [10].

$$DR = \frac{M_t - M_{(t+dt)}}{dt} \quad (2)$$

Burada: M_t ; t anındaki nem içeriği (g nem/g kuru madde), dt; dakika, DR; kuruma oranı (g nem.g kuru madde dakika).

2.5. Nem Oranı (MR) (Moisture Ratio)

Kurutma işlemi esnasındaki ihlamurdan uzaklaşan nem miktarının süreye bağlı oran değerlerini belirlemek için 3 numaralı eşitlik kullanılmıştır [19].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

Burada: **MR**; Nem oranı, M ; Ürünün anlık nem içeriği [(g nem/g kuru madde)], M_e ; Ürünün denge nem içeriği [(g nem/g kuru madde)], M_0 ; Ürünün ilk nem içeriğidir. [(g nem/g kuru madde)]. En uygun ince tabaka kuruma modelini belirlemek için kullanılan eşitlikler (4-6) arasında verilmiştir.

2.6. Matematiksel Modelleme (Mathematical Modeling)

Tespit edilen süreye bağlı deneysel nem oranı değerleri ince tabakalı matematiksel modellerde işlenerek nem oranı-süre ilişkisini tespit etmek için en uygun model belirlenmiştir. Çalışma kapsamında literatürde en yaygın olarak kullanılan modellerden bazıları seçilmiştir. Bu modeller literatürde en yaygın kullanılanlar arasında olduğu ve iyi sonuçlar alındığı için tercih edilmiştir.

$$\text{Lewis} \quad MR = \exp(-k \cdot t) \quad [18] \quad (4)$$

$$\text{Jena-Das} \quad MR = k \cdot \exp(-h \cdot t + j(t^{0.5}) + m) \quad [34] \quad (5)$$

$$\text{Wang-Sing} \quad MR = 1 + k \cdot t + h \cdot t^2 \quad [31] \quad (6)$$

Burada: h, j, k, m; modellere ait katsayılar, t; süre

2.7. Efektif Difüzyon-Aktivasyon Enerjisi (Effective Diffusion-Activation Energy)

Kurutma işlemlerinde ihlamurdan uzaklaşan nemin efektif kütle difüzyon değerlerini hesaplamak için 7 numaralı eşitlik kullanılmıştır [8].

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L^2} \quad (7)$$

Burada: D_{eff} ; efektif difüzyon değerini (m^2/s), L; ürünün kalınlık değerinin (m) yarısını temsil etmektedir.

Ürün kalınlık değeri kumpas (0.01 mm) aracılığıyla küçük bir yığının yataydaki ortalama değeri tespit edilmiştir. Ürün kalınlığı 0.01 ± 0.0035 m olarak tespit edilmiştir. İhlamurdan kurutulan şartlar altında bir mol nem uzaklaştırabilmek için gerekli aktivasyon enerji değeri ise 8 numaralı eşitlik kullanılarak tespit edilmiştir.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

Burada: R; gaz sabiti (8.3143 kJ/mol K), E_a ; akitvasyon enerjisi (kJ/mol) ve T (K°); kurutma havası sıcaklığı, D_0 ; difüzyon katsayısını temsil etmektedir.

2.8. Buharlaştırma Enerjisi (BE) (Evaporation Energy)

Kurutma işlemlerinde ıhlamurdan buharlaşan nemin enerji değerini hesaplamak için 9 numaralı eşitlik kullanılmıştır [2].

$$Q_w = h_{fg} \times m_w \quad (9)$$

$$h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 \times (T_d - 273.16) \\ 273.16 \leq T_d(K) < 338.72$$

$$h_{fg} = \sqrt{(7.33 \times 10^{12} - 1.60 \times 10^7 \times T_d^2)} \\ 338.72 \leq T_d < 533.16$$

Burada: Q_w ; buharlaştırma enerjisi (kWh), h_{fg} ; buharlaştırma gizli enerjisi (kJ/kg), m_w ; buharlaşan nem miktarı (kg). T_d ; kurutma sıcaklığı (°K).

2.9. Renk Değeri (Color Value)

Taze ve kurutulan ıhlamur örneklerinin parlaklık (L), kırmızı/yeşil (a) ve sarı/mavi (b) değerlerini ölçmek için CR400 model/Japan renk ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçülen değerler laboratuvar değerler olup bunlar kullanılarak kroma, hue ve toplam renk değişim değerleri hesaplanmıştır (10-12). Kroma değeri ürünün renk tonunu belirtirken solgun ürünlerde düşük kaliteli ürünler ise yüksek değerler hesaplanmaktadır. Hue değeri ürün renk değerlerinin 360° lik bir radyanttaki yerini belirtmektedir. Sınır açısı değerlerinden 0° ; kırmızı, 180° ; yeşil, 90° ; sarı ve 270° ; mavi ana renkleri temsil etmektedir. Toplam renk değişim değeri ise kurutma işlemlerinde ısıyla parçalanmış (enzimatik olmayan) renk pigmentlerinin toplam değişimini göstermektedir. Hesaplanan renk değerlerini daha çok ticari değeri ve tüketici için karar verici olması açısından önemlidir. Bu değerleri hesaplamak için (10-12) eşitlikler kullanılmıştır.

$$\text{Kroma} \quad C = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad [25] \quad (10)$$

$$\text{Hue} \quad h^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad [1] \quad (11)$$

$$\text{Renk değişimi} \quad \Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \quad [28] \quad (12)$$

L^* , a^* ve b^* değerleri kurutulmuş ıhlamur örneklerinin parlaklık, kırmızılık ve sarılık renk değerlerini göstermektedir.

2.10. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Kurutma işlemi ve ölçüm aşamalarında gerçekleşen standart sapma değerlerinden kaynaklı toplam belirsizlik değerini hesaplamak için 13 numaralı eşitlik kullanılmıştır [20-16].

$$W_x = \sqrt{[(X_1)^2 + (X_2)^2 + (X_3)^2 + \dots + (X_n)^2]} \quad (13)$$

$X_1; X_2; X_3; \dots X_n$ ölçüm aletlerinin hassasiyetlik değerlerinin göstermektedir.

2.11. İstatistiksel Analiz (Statistical analysis)

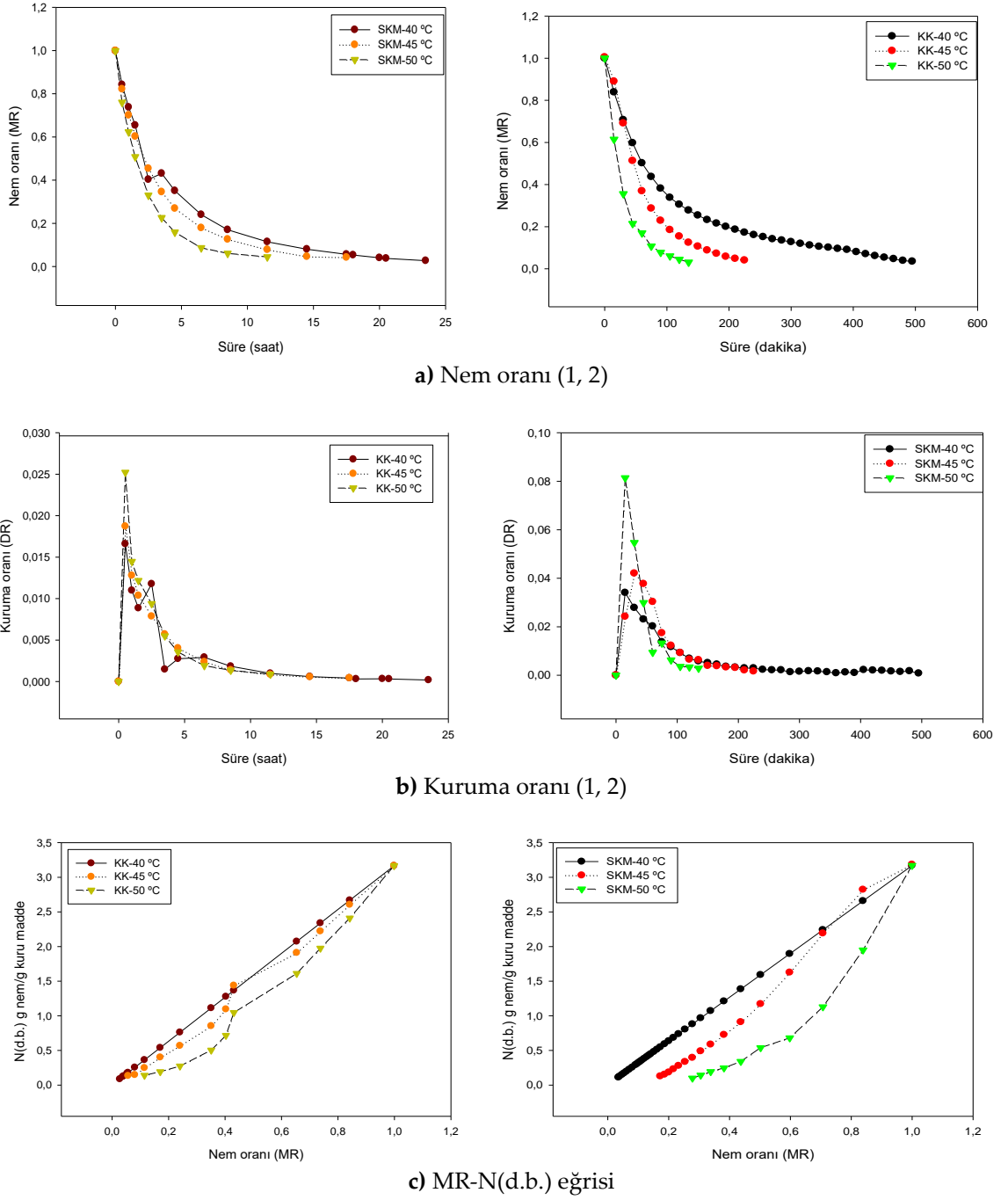
Kurutulan ıhlamur örneklerinin matematiksel modellerini oluşturmak için ($P<0.05$) SigmaPlot 10. Programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen bulguları istatistiksel açıdan değerlendirmek için SPSS 17. programında Duncan çoklu karşılaştırma testi ($P<0.05$) yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Nem ve Kuruma Oranı (Moisture and Dry Ratio)

Konvektif (1) ve imal edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga (2) kurutucu ile kurutulan ıhlamur örneklerinin kuruma eğrileri Şekil 2'de verilmiştir.

ıhlamur örneklerinin nem değeri 3.21 ± 0.19 'den 0.12 ± 0.02 g nem/g kuru madde değerine kadar kurutulmuştur. Şekil 2'ye göre, imal edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile ıhlamurlar istenilen nem düzeyine daha kısa sürede ulaşmıştır. Sıcaklık kontrollü mikrodalgada kurutucu konvektif kurutucuya göre kuruma süresini % 69.69 oranında azaltmıştır. Kurutma sıcaklığının artmasıyla ürünün hem nem oranı hem de kuruma oranı değerleri artmıştır. Kurutma sıcaklığının artması birim zamanda daha fazla nem uzaklaştırmıştır. Bu olay kuruma oranının artırmıştır. Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucuda ıhlamur örnekleri konvektif kurutucuya göre daha hızlı kurumıştır. Konvektif kurutma işleminde tespit edilen en yüksek kuruma oranı 0.0252 g nem/g kuru madde.dakika olarak tespit edilirken sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucuda bu değer 0.0814 g nem/g kuru madde.dakika olarak tespit edilmiştir. Modifiye edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ıhlamurun kuruma oranını % 69.04 oranında artırmıştır. Kuruma ve nem oranı parametreleri için sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu performansının daha iyi olması ısıyı direkt ürün içerisinde oluşturarak kütle difüzyonunun daha efektif bir şekilde gerçekleşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Nguyen ve diğ. [21], limon otunu konvektif bir kurutma fırınında 50, 55, 60 ve 65 °C sıcaklıklarda kuruttuğu çalışmada kuruma süresi değerlerine sıcaklığın önemli etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla uzaklaşan nemin oranı ve kuruma oranı değerlerinin arttığını bildirmişlerdir. Çalışmalarında maksimum kuruma oranı değerini 0.14 g nem/g kuru madde.dakika (65 °C) olarak tespit etmişlerdir. ıhlamur için tespit edilen maksimum kuruma oranı değerinden daha fazla olmasının başlıca nedeni kurutma sıcaklığının yüksek olması ve bunun yanında ürünlerin mikro-yapı ve fiziksel özelliklerinde farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Selvi [26], ıhlamur yapraklarını infrared kurutucu ile 50, 60 ve 70 °C sıcaklıklarda 0.10 g nem/g kuru madde değerine kadar kurutmuştur. Kurutma sıcaklık değerlerine göre ıhlamur örnekleri sırasıyla 50, 30 ve 20 dakikada istenilen nem değerine düştüğü görülmüştür. Yapılan çalışmada ise ıhlamur örnekleri sıcaklık kontrollü mikrodalgada 40, 45 ve 50 °C sıcaklıklar için sırasıyla 495, 225 ve 135 dakika olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebi sıcaklık kontrollü mikrodalgada yapılan kurutma işlemleri kesikli (on-off) kurutma prensibiyle çalıştığı için toplam kuruma süresinde daha fazla olmuştur. Bunun yanında infrared ve mikrodalga enerjilerin termal özelliklerinin farklı olmasında etkilemiştir.



Şekil 2. Kurutulmuş ihlamur örneklerinin a) nem oranı, b) kuruma oranı değerleri, c) MR-N(d.b.)

Figure 2. a) moisture content, b) drying rate values of dried linden samples, c) MR-N(d.b.)

3.2. Matematiksel Modelleme (Mathematical Modeling)

Ihlamur örneklerinin deneysel kuruma oranlarına ait model sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Matematiksel modellere ait veriler

Table 1. Data of mathematical models

Modeller	Yöntem	Sıcaklık (°C)	k	h	j	m	p	R ²
Lewis	Konvektif	40	0.2511	-	-	-	<0.0001	0.9784
		45	0.3000	-	-	-	<0.0001	0.9891
		50	0.4386	-	-	-	<0.0001	0.9952
	Sıc. kont. mikrodalga	40	0.0089	-	-	-	<0.0001	0.9560
		45	0.0152	-	-	-	<0.0001	0.9891
		50	0.0319	-	-	-	<0.0001	0.9954
Jena Das	Konvektif	40	0.9655	0.5171	0.5817	-0.0286	<0.0001	0.9938
		45	0.9756	0.5438	0.5281	-0.0217	<0.0001	0.9923
		50	0.9841	0.6141	0.3873	-0.0157	<0.0001	0.9967
	Sıc. kont. mikrodalga	40	0.9497	0.4078	0.7999	-0.0567	<0.0001	0.9689
		45	1.0280	0.4119	0.7918	-0.0234	<0.0001	0.9922
		50	0.9949	0.4197	0.7762	-0.0047	<0.0001	0.9955
Wang Singh	Konvektif	40	-0.1353	0.0043	-	-	<0.0001	0.8419
		45	-0.1918	0.0089	-	-	<0.0001	0.9159
		50	-0.3106	0.0243	-	-	<0.0001	0.9579
	Sıc. kont. mikrodalga	40	-0.0056	0.0008	-	-	<0.0001	0.8168
		45	-0.0110	0.0031	-	-	<0.0001	0.9778
		50	-0.0203	0.0001	-	-	<0.0001	0.9379

Çizelge 1'e göre Lewis modeli ıhlamur örneklerinin deneysel nem oranlarını en iyi (R^2 : 0.9954) sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile 50 °C sıcaklıkta yapılan kurutma işlemi için tahmin etmiştir. Jena-Das modeli deneysel nem oranı değerlerini en iyi (R^2 : 0.9967) konvektif kurutucu ile 50 °C sıcaklıkta yapılan kurutma işlemi için tahmin etmiştir. Wang-Sing modeli ise nem oranı değerlerini en iyi (R^2 : 0.9778) sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucuda 45 °C sıcaklıkta tahmin etmiştir. Modeller arasında ıhlamur örneklerine ait her sıcaklık için elde edilen deneysel nem oranı değerlerini en iyi Jena-Das modeli tahmin etmiştir.

3.3. Efektif Difüzyon ve Aktivasyon Enerji Değerleri (Effective Diffusion and Activation Energy Values)

Kurutulan ıhlamur örneklerinin efektif difüzyon ve aktivasyon enerji değerlerine kurutma işlemlerinin etkisi Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Ihlamur örneklerine ait efektif difüzyon-aktivasyon enerji değerleri

Table 2. Effective diffusion-activation energy values of linden samples

Kurutma yöntemi	Sıcaklık (°C)	Efektif difüzyon (m ² /s)	Aktivasyon enerji (kJ/mol)
Konvektif	40 °C	6.02×10 ⁻⁶	74.50
	45 °C	8.25×10 ⁻⁶	
	50 °C	1.46×10 ⁻⁵	
Sıc. Kont. Mikrodalga	40 °C	2.35×10 ⁻⁷	122.47
	45 °C	5.88×10 ⁻⁷	
	50 °C	1.01×10 ⁻⁶	

Çizelge 2'ye göre kurutma yöntemi ve sıcaklık değerlerinin ıhlamur örneklerinin efektif difüzyon değerlerini etkilemiştir. Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu ile yapılan kurutma işlemlerinin efektif difüzyon değerleri konvektif kurutma yöntemine göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Bunun sebebi konvektif kurutucuda ıhlamur örneklerinin kuruma oranı sıcaklık kontrollü kurutucuya göre daha düşük olduğu için buharlaşan nemin daha aerosol bir hal aldığı düşünülmektedir. Bu sebeple nemin yayıldığı alan miktarında artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bunun diğer nedeni genel mikrodalga fırınların çalışmasından farklı olarak bu kurutucuda kontrol paneline girilen dinlenme süresine göre kesikli bir şekilde kuruma gerçekleşmesi nedeni olmuştur. Konvektif kurutma işleminde tespit edilen efektif difüzyon değerleri 1.46×10^{-5} - 6.02×10^{-6} m²/s arasında değişmiştir. Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutma işleminde ise bu değerler 1.06×10^{-6} - 2.35×10^{-7} m²/s arasında değiştiği belirlenmiştir. Konvektif yöntemle kurutulan ıhlamurun aktivasyon enerji değeri 74.50 kJ/mol, sıcaklık kontrollü mikrodalgada ise bu değer 122.47 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Aktivasyon enerji değerinin sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutma işleminde daha yüksek olmasının nedeni üründen ilk buharlaşmanın olabilmesi için daha fazla enerji gerektiğini göstermektedir. Bunun sebebi imal edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucunun kesikli (on-off) kurutma prensibiyle çalışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanında mikrodalga enerjisi direk ürün içerisinde bir ısı oluşturmada fakat ürün fırın içerisinde sürekli hareket halinde olması ve ürünün mikrodalga enerjisi açısından termal özellik, di elektrik faktörü gibi parametrelerinde aktivasyon enerji üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Nguyen ve diğ. [21], konvektif kurutucu ile 50, 60 ve 70 °C sıcaklıklarda kuruttukları limon otunun efektif difüzyon değerinin 7.64×10^{-11} - 1.48×10^{-10} m²/s arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada limon otu için belirlenen efektif difüzyon değerlerinin daha düşük olmasının nedeni kurutucunun termodinamik özelliklerinin farklı olması ve ürünlerin fiziksel yapısının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.4. Renk Verileri (Color Values)

Taze ve kurutulan ıhlamur örneklerinin renk değerleri kurutma yöntemi ve sıcaklıkların etkisi Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Ihlamur örneklerinin renk değerleri

Table 3. Color values of linden samples

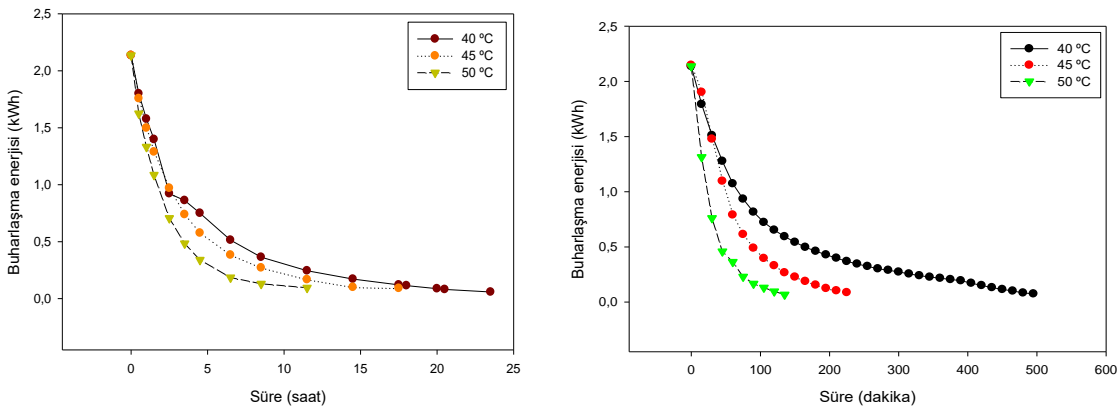
Kurutma yöntemi	L	a	b	C	ΔE	
Taze	55.05±4.55ab	-5.71±4.06c	23.11±2.23a	24.06±2.90a	-	
Konvektif	40 °C	46.48±9.77d	-0.82±2.25ab	16.47±2.86d	16.64±2.84e	15.08±6.30a
	45 °C	59.29±2.03a	-2.58±1.66b	19.46±1.79b	19.69±1.75bc	8.63±3.07b
	50 °C	53.52±7.78bc	0.72±1.93a	18.71±3.00bc	18.82±2.96cd	11.76±5.57ab
Sıc. Kont.	40 °C	54.76±2.71ab	-1.18±2.35b	16.90±3.16cd	17.09±3.13de	9.22±3.94b
	45 °C	48.82±5.52cd	0.74±2.78a	20.62±1.51b	20.81±1.50b	12.08±4.56ab
Mikrodalga	50 °C	51.10±5.78bcd	-1.31±2.29b	17.46±2.37cd	17.63±2.53de	10.82±5.70b

Çizelge 3'e göre taze ıhlamurun parlaklık değerleri ile sıcaklık kontrollü mikrodalgada 40 °C'de kurutulan örnekler hariç diğer yöntemlerde kurutulan örnekler arasında önemli düzeyde ($p < 0.05$) bir fark olmuştur. Parlaklık değeri açısından sıcaklık kontrollü mikrodalgada 40 °C'de kurutulan örnekler arasında istatistiksel olarak önemli düzeyde ($p > 0.05$) bir fark olmamıştır. Taze ıhlamurun "a", "b" ve "C" değerleri için tüm yöntemlerde kurutulan örneklerin "a", "b" ve "C" değerleri arasında önemli düzeyde ($p < 0.05$) bir fark olmuştur. Taze ıhlamur örneklerinin kroma değerini en iyi sıcaklık kontrollü mikrodalgada 45 °C sıcaklıkta yapılan kurutma işlemi muhafaza etmiştir. Toplam renk değişimi açısından en uygun kurutma işlemi olarak ise konvektif kurutucuda 45 °C ile sıcaklık kontrollü mikrodalgada 40 ve 50 °C sıcaklıkların daha uygun olduğu bulunmuştur. Selvi ve ark. [26], taze ıhlamurun renk değerlerine infrared kurutucu ile yapılan sıcaklıkların önemli düzeyde ($p < 0.05$) etki ettiğini tespit etmiştir. Taze ıhlamurun "L" ve "C" ile 50 °C sıcaklıkta kurutulan örneklerin "L" ve "C"

değerleri açısından önemli düzeyde ($p>0.05$) bir fark olmamıştır. Çalışmada düşük sıcaklıkta ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) ıhlamurun kurutulması renk değerleri açısından daha iyi sonuç aldığını tespit etmiştir. Yapılan bu çalışma ile kıyaslandığında her iki kurutma yönteminde düşük kurutma sıcaklıklarında ($40, 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) tazenin renk özelliklerini daha iyi muhafaza etmiştir. Bunun nedeni ıhlamur örneklerindeki “a (yeşil)” ve “b (sarı)” renk pigmentlerin yüksek sıcaklıklara karşı hassas olduğu ve parçalanarak kaybolduğu düşünülmektedir. Beigi [3], çalışmasında $40, 50$ ve $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda kuruttuğu nane bitkisinin son renk değerleri açısından benzer bir durum olduğu görülmüştür.

2.5. Buharlaştırma Enerjisi (Evaporation Energy)

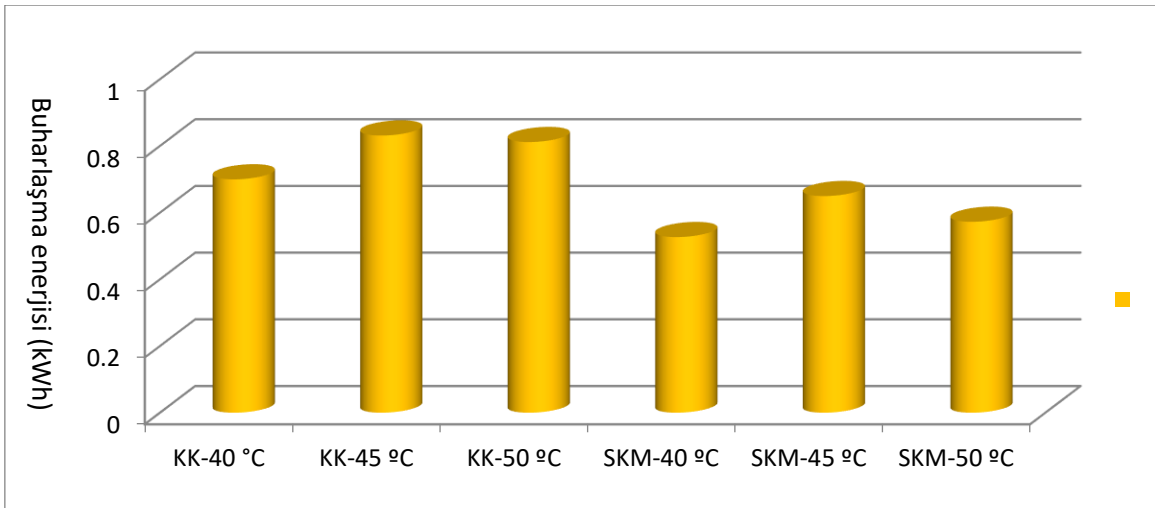
ıhlamur yapraklarının kurutulması işlemlerinde ortaya çıkan buhar enerjisinin kinetiği Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Kurutulan ıhlamur örneklerinin buharlaştırma enerjisi

Figure 3. Evaporation energy of dried linden samples

Kurutma işlemleri için belirlenen ortalama buharlaştırma enerji değerleri Şekil 4’te veirlmiştir.



Şekil 4. Kurutulan ıhlamur örneklerinin ortalama buharlaştırma enerjisi

Figure 4. Average evaporation energy of dried linden samples

Şekil 4’e göre kurutma yöntemleri ve sıcaklıkları buharlaştırma değerlerine etki etmiştir. Konvektif yöntemle yapılan kurutma işlemlerinde kurutulan ıhlamur örneklerinin buharlaştırma enerjileri sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucularda kurutulan örneklere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi efektif difüzyon değerlerinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü

uzaklaşan nem daha büyük alana yayılarak nemin süpürdüğü yüzey alanının artması dolayısıyla buharlaşma enerjisininide artırdığı düşünülmektedir. Konvektif kurutucuda 40, 45 ve 50 °C sıcaklıklarda kurutulan ıhlamur örneklerinin ortalama buharlaşma enerji değerleri sırasıyla 0.6998, 0.8312 ve 0.8117 kWh olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucuda yapılan kurutma işleminin ortalama buharlaşma enerji değerleri sırasıyla 0.5267, 0.6497 ve 0.5726 kWh olarak hesaplanmıştır. Rabha ve diğ. [24], konvektif kurutucuda 50 °C sıcaklıkta kurutulan biber kurutma çalışmasında buharlaşma enerji değerini 0.6636 kWh (2.37 MJ/kg) olarak hesapladıklarını bildirmişlerdir. Literatürde tespit edilen verilerle çalışma kapsamında elde edilen bulguların uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

2.6. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Kurutma işlemi esnasında kullanılan ölçüm alet ve ekipmanların hassasiyet değerleri kullanılarak belirsizlik analizi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan ölçüm alet ve ekipmanların hassasiyet değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Hassasiyet değerleri

Table 4. Sensitivity values

Ölçüm aletleri	Hassasiyet değerleri
Tartım cihazı	± 0.001 g
Kumpas	± 0.2 mm
Renk ölçer (ΔE için)	± 0.6
Sıcaklık ölçümü (Konvektif)	± 1.5 °C
Sıcaklık ölçümü (Sıc. kont. mikrodalga)	± 2 °C

Veriler Eşitlik 13'de işlenerek kurutma işleminde kontrol edilemeyen belirsizlik değeri 6.651 olarak hesaplanmıştır. Kumar ve diğ. (2015), yaptıkları çalışmada belirsizlik değerini 1.06 olarak tespit etmişler.

3. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Kurutma yöntemleri ve sıcaklık değerlerinin ıhlamurun kuruma kinetiği, renk kalitesi ve buharlaşma enerji değerine etki ettiği belirlenmiştir. Her iki yöntem de kurutma sıcaklığının artmasıyla kuruma süresinin önemli oranda azaldığı görülmüştür. İmal edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu konvektif kurutucuya göre kuruma süresini azalttığı, kuruma oranını artırdığı, renk değerlerini daha iyi koruduğu görülmüştür. ıhlamur örnekleri konvektif kurutma işleminde daha yüksek efektif difüzyon değerleri ve buharlaşma enerjisi ve daha az renk değişimine neden olduğu görülmüştür. Modifiye edilen sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucunun bu çalışmada incelenen performans özellikleri açısından ıhlamurun kurutulması için uygun olduğu bulunmuştur.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Çalışma etik standartlara uygun olarak yürütülmüştür.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Muhammed TAŞOVA: Kavramsallaştırma, Veri iyileştirme, Biçimsel analiz, Araştırma, Doğrulama, Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme.

Hakan POLATCI: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Tüm yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışma herhangi bir kurum tarafından fonlanmamıştır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Veriler uygun istek üzerine sunulabilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. A. Alemrajabi, F. Rezaee, M. Mirhosseini, ve A. Esehaghbeygi, "Comparative evaluation of the effects of electrohydrodynamic, oven, and ambient air on carrot cylindrical slices during drying proces" *Drying Technology*, 30, 88–96, 2012.
- [2] M. Beigi, "Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying", *Food Science and Technology*, 36(1): 374-382, 2016.
- [3] M. Beigi, "Drying of mint leaves: influence of the process temperature on dehydration parameters, quality attributes, and energy consumption", *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1): 77-88, 2019.
- [4] A. K. Bhardwaj, R. Kumar, R. Chauhan, ve S. Kumar, "Experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of SHS and PCM for drying chilli in the Himalayan region", *Thermal Science and Engineering Progress*, 20: 2020. doi: 10.1016/j.tsep.2020.100713.
- [5] C. Bonazzi, E. Dumoulin, "Quality changes in food materials as influenced by drying processes", 2011. doi: 10.1002/9783527631667.ch1.
- [6] G. Boztaş, A. B. Avcı, O. Arabacı, ve E. Bayram, "Tıbbi ve aromatik bitkilerin dünyadaki ve Türkiye'deki ekonomik durumu", *Teorik ve Uygulamalı Ormancılık*, 1:27-33, 2021.
- [7] Comtrade, "International Trade Center", <https://www.trademap.org> 2021, (Erişim tarihi: 18.04.2021).
- [8] O. Corzo, N. Bracho, A. Pereira, A. Vasquez, "Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices". *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 2023-2028, 2008.
- [9] S. P. Göztok, ve F. İçier, "Karbon fiber destekli kabin kurutucuda farklı sıcaklıklarda elma dilimlerinin kurutulmasının incelenmesi: kurutma karakteristikleri ve performans değerlendirmesi". *Akademik Gıda*, 15(4): 355-367, 2017.
- [10] İ. Doymaz, N. Tugrul, ve M. Pala, "Drying characteristics of dill and parsley leaves", *Journal of Food Engineering*, 77:559-565, 2006.
- [11] H. S. El-Mesery, A. E. F. Abomohra, C. U. Kang, J. K. Cheon, B. Basak, ve B. H. Jeon, "Evaluation of infrared radiation combined with hot air convection for energy-efficient drying of biomass", *Energies*, 12(14), 2019. doi: 10.3390/en12142818.
- [12] H. S. El-Mesery, R. M. Kamel, ve R. Z. Emara, "Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer". *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 2021. doi: 10.1016/j.csite.2021.101365.
- [13] FAO, "Trade in medicinal plants", <http://www.fao.org/3/af285e/af285e00.pdf> 2005. (Erişim Tarihi: 18.04.21).
- [14] S. Jena, ve H. Das, "Modeling for vacuum drying characteristics of coconut presscake", *Journal of Food Engineering*, 79: 92-99, 2007.
- [15] M. Kaveh, V. R. Sharabiani, R. A. Chayjan, E. Taghinezhad, Y. Abbaspour-Gilandeh, ve I. Golpour, "ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer". *Information Processing in Agriculture*, 5(3): 372-387, 2018.
- [16] A. K. Karthikeyan, ve S. Murugavelh, "Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer", *Renewable Energy*, 128 (Part A): 305-312, 2018.

- [17] C. Kumar, G. J. Millar, ve M. A. Karim, "Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material", *Drying Technology*, 33(2): 227-237, 2015.
- [18] W. K. Lewis, "The Rate of Drying of Solid Materials", *Industrial Engineering Chemistry*, 13: 427-432, 1921.
- [19] M. Maskan, "Microwave/air and microwave finish drying of banana", *Journal of Food Engineering*, 44: 71-78, 2000.
- [20] R. J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1): 3-17, 1988.
- [21] T. V. L. Nguyen, M. D. Nguyen, D. C. Nguyen, L. G. Bach, ve T. D. Lam, "Model for thin layer drying of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) by hot air", *Processes*, 7(1), 2019. doi: 10.3390/pr7010021.
- [22] H. Polatçı, ve M. Taşova, "Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutma yönteminin alıç (*Crataegus* spp. l.) meyvesinin kuruma karakteristikleri ve renk değerleri üzerine etkisi", *Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(10): 1130-1135, 2017.
- [23] T. M. Rababah, M. Al-u'datt, M. Alhamad, M. Al-Mahasneh, K. Ereifej, J. Andrade, B. Altarifi, A. Almajwal, ve W. Yang, "Effects of drying process on total phenolics, antioxidant activity and flavonoid contents of common Mediterranean herbs", *International Journal of Agriculture Biology Engineering*, 8, 145-150, 2015.
- [24] D. K. Rabha, P. Muthukumar, ve C. Somayaji, "Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger", *Renewable Energy*, 105: 764-773, 2017.
- [25] L. A. Ramallo, ve R. H. Mascheroni, "Quality evolution of pineapple fruit during drying process", *Food and Bioproducts Processing*, 99, 275-283, 2012.
- [26] K. Ç. Selvi, "Investigating the influence of infrared drying method on linden (*Tilia platyphyllos* Scop.) leaves: kinetics, color, projected area, modeling, total phenolic, and flavonoid content", *Plants*, 9(7), 2020. doi: 10.3390/plants9070916.
- [27] V. R. Sagar, P. ve Suresh Kumar, "Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review", *Journal of Food Science and Technology*, 47: 15-26, 2010.
- [28] M. Tan, K. J. Chua, A. S. Mujumdar, ve S. K. Chou, "Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation of drying rate and color changes during drying of potato and pineapple", *Drying Technology*, 19(9): 2193-2207, 2001.
- [29] M. Taşova, "Sıcaklık Kontrollü Bir Mikrodalga Kurutucu Geliştirilmesi Ve Performansının Belirlenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Tokat*, 2016.
- [30] TÜİK, "Dış ticaret istatistikleri", <https://biruni.tuik.gov.tr/disticaretapp/menu.zul> 2021. (Erişim tarihi: 18.04.2021).
- [31] C. Y. Wang, ve R. P. Singh, "A single layer drying equation for rough rice", *ASAE Paper No: 78-3001*, ASAE, St. Joseph, MI. 1978.
- [32] Z. Wissam, A. A. Nour, J. Bushra, N. Zein, ve D. Saleh, "Extracting and studying the antioxidant capacity of polyphenols in dry linden leaves (*Tilia cordata*)", *Journal of Pharmacogn. Phytochem*, 6, 258-262, 2017.
- [33] A. Yağcıoğlu, "Tarımsal Ürünleri Kurutma Tekniği", *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi yayınları* No: 536. Bornova, İzmir. 1999.
- [34] S. Jena, H. Das, "Modeling for vacuum drying characteristics of coconut presscake", *Journal of Food Engineering*, 79, 92-99, 2007.



KINEMATIC ANALYSIS OF CONSTANT BREADTH CAM DRIVEN LINKAGES

¹Mert Eren AYGAHOĞLU , ²Ziya ŞAKA 

*Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Mechanical Engineering Department,
Konya, TÜRKİYE*

¹meaygahoglu@ktun.edu.tr, ²zsaka@ktun.edu.tr

Highlights

- Different forms of constant breadth curves are obtained and given.
- Support functions of the curves are given.
- The kinematics of the constant breadth cam mechanisms are shown.
- Different positions of cam driven mechanisms are illustrated.
- The kinematics of constant breadth cam driven mechanisms are given.
- The effect of the fixed joint location of the mechanisms on kinematics are explained.



KINEMATIC ANALYSIS OF CONSTANT BREADTH CAM DRIVEN LINKAGES

¹Mert Eren AYGAHOĞLU , ²Ziya ŞAKA 

*Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Mechanical Engineering Department,
Konya, TÜRKİYE*

¹meaygahoglu@ktun.edu.tr, ²zsaka@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 10.02.2023; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.04.2023)

ABSTRACT: Several constant breadth curves are defined that can be used as cam profiles in constant breadth cam mechanisms that are closed cam mechanisms. There are two objectives for this study. One of them is to study the kinematic analysis of different type of constant breadth cam mechanisms. The other objective is to obtain a dwell period for constant breadth cam driven linkages that is impossible for a standard cam mechanism. A general kinematic analysis of a constant breadth cam mechanism with translating flat-faced follower was carried out with the principle of kinematic inversion. With the results, the kinematic analyses of the constant breadth cam driven inverted slider crank mechanism and four bar mechanism were examined in detail and a general method is given for all constant breadth cam profiles and cam driven linkages. It has been seen that a dwell period of 45° (with the fixed joint coordinates as $x_n = 18$ mm and $y_n = 8.5$ mm) and 40° (with the fixed joint coordinates as $x_n = 18.5$ mm and $y_n = 8.5$ mm) can be obtained in designed cam driven four bar and inverted slider crank mechanism respectively. After the displacement analysis, some velocity and acceleration analysis examples are given by taking the derivative of displacement. Similar kinematic analyses are possible for cam-driven mechanisms with more links. Also, it has been seen that changing the location of fixed joint of the cam profile can affect the displacement, velocity and acceleration graphics of the mechanism. With this, the dwell period can be changed too.

Keywords: Support Function, Constant Breadth Curve, Constant Breadth Cam Mechanism, Cam Driven Mechanism, Kinematic Analysis

1. INTRODUCTION

Profiles with a curved surface that either have a point or line contact are called cam and the mechanisms that convert the circular motion into alternative motion and have cams as a link are called cam mechanisms.

Cam mechanisms play an important role in modern automatic machines due to their high speed and high precision. The transmission accuracy, stability and lifetime of a cam-follower system are highly related to its kinematic and dynamic performances, while the kinematic and dynamic performances depend essentially on the mathematical characteristic of the cam profile[1].

One of the most important problems to be considered in cam mechanisms is to ensure continuous contact between the follower and the cam profile. In this respect, these mechanisms are divided into form closed cam mechanisms and force closed cam mechanisms. Force closed cam mechanisms, in which pre tension elements such as springs are used, are the most widely used cam mechanisms in practice. An important advantage of constant breadth cam mechanisms, which are form closed cam mechanisms, compared to force closed cam mechanisms is that they provide simplicity and cheapness in construction since there is no need to use pre tension elements such as springs. Therefore, this type of cam mechanisms are highly preferred systems in many applications that do not require high precision at medium speed [1], [2].

There are many studies in the literature on constant breadth curves that can be used as cam profiles in constant breadth cam mechanisms. An extensive list of literature on this topic is given in reference [3]. Theoretical information on constant breadth curves and constant breadth bodies are also included in the same resource.

*Corresponding Author: Mert Eren AYGAHOĞLU, meaygahoglu@ktun.edu.tr

Rabinowitz [4] and many other researchers [2], [3], [5], [6] used support functions to obtain constant breadth curves, after that, they studied the parametric and polynomial equations of the curves. They also showed that many different constant breadth curves could be obtained by giving different values to the equation variables used. H. L. Resnikoff, in his study [7], studied the constant breadth curve equation and the parameters (support function, the radius of curvature, curve arc length, curve area, etc.) of constant breadth curves by using the Fourier series. The author also stated that he obtained many constant breadth surfaces based on the Fourier series. In a similar study, Andrew David Irving [8] calculated the parameters of constant breadth curves without using the Fourier series and simplified the radius of curvature formula to be limited to constant breadth curves. The author also stated that he obtained some theoretical results about constant breadth curves. In his comprehensive book, Harold A. Rothbart [2] examined the dynamic analysis, synthesis, manufacturing methods of cam mechanisms with different types and properties and differences of cam mechanisms to other mechanisms. The author dealt with many geometric, kinematic, and dynamic concepts related to cam mechanisms in detail and gave theoretical and practical information about them. Chatchawan Panraksa and Lawrence C. Washington [9] stated that there are isolated points outside the original curve in the constant breadth curve that Rabinowitz studied, and they tried to construct that constant breadth curve without isolated points. Lucie Paciotti [10] studied the Reuleaux triangle, a circle and Rabinowitz's constant diameter curve with equal breadth. The author stated that these curves could be obtained and the difference between these curves can be determined by creating shadow functions with the principle of shedding light from a certain direction. As a result of the author's work, Lucie Paciotti stated that the parameters of any differentiable curve could be found with the shadow function of that curve. In their study, S. G. Dhande and N. Rajaram [11] studied the kinematic analysis of constant breadth cam mechanisms using two different constant breadth cam profiles and two different follower types, translating and oscillating follower. The first of the cam profiles is the profile consisting of Reuleaux type circular arcs. The other is the three cusped hypocycloid-based constant breadth cam profile previously introduced by Euler [3]. In the analysis of the second profile, they used geometric properties of the hypocycloid. Zhang Jinjiang [12] stated that he found a new type of constant breadth curve using polar tangent coordinates in his work. The author analyzed the parameters of this type of curve mathematically. Zhang Jinjiang stated that in convex constant breadth curves, symmetrical constant breadth curves are mostly obtained with circular arcs, and asymmetric constant breadth curves are obtained mostly with Reuleaux triangles. Giorgio Figliolini and Pierluigi Rea [13], examined motion analysis in mechanisms that use the Reuleaux triangle and the modified Reuleaux triangle. They stated that they did the motion analysis of mechanisms by formulating suitable algorithms as a result of many simulations. From there they analyzed a square-hole drill that makes use of the modified Reuleaux triangle with a rounded corner, along with the motion analysis of the Wankel engine. Ş. Yüzbaşı and M.Karaçayır [14] studied to obtain a solution for first order linear differential equation system characterizing curves of constant breadth in Euclidean 3-space. They stated that they outlined a numerical method for the solution. The method they used relies on transforming the given problem to a system of linear equations, whose solution yields three polynomials of degree N as the approximate solutions. According to the obtained numerical results, increasing the parameter N improves the accuracy of the solution. The authors also stated that the proposed method can be used to solve models of similar type with a high accuracy. Honda Satoshi and Tanaka Shun [15] stated that they integrated the reduction mechanism into the constant breadth cam mechanism to be used in the inchworm engine. They analyzed the relational expression between rotations of the constant breadth cam and the engaging approach of the inchworm motion. Also they examined the performances of the reduction mechanism integrated into the constant breadth cam mechanisms. Liangwen Wang and his friends studied [16] the configuration of a bionic horse robot for equine-assisted therapy. The mechanism's structure is that a single-leg system with two degrees of freedom (DOFs) is driven by a cam linkage, and it can adjust the span and height of the leg end-point trajectory. In their analysis, they stated that using a constant breadth cam driven four bar mechanism simplifies the robot's control system. Asgari et al. [17] designed and manufactured a wearable passive cam-driven shoulder exoskeleton. They used modular spring -cam-wheel module that generates an

assistive force to compensate the shoulder elevation moment due to gravity. They also performed a pilot biomechanics study to evaluate the effect of the exoskeleton on muscle activity and shoulder kinematics. After obtaining the results, they stated that, the exoskeleton they proposed can assist shoulder movement against gravity. Enrique and Irene [18], designed, manufactured and measured metallic and plastic constant breadth cam mechanisms. They compared the cams in terms of dimensional accuracy and surface finish. Their aim was to evaluate if it would be possible to replace metallic cam with a plastic one for a short period of time. According to the results they obtained, they stated that, the replacement is only recommended for applications of low-power transmission. Artobolevsky [19], gave many examples of cam mechanisms in practice, including constant breadth cam mechanisms, and explained their working principles. Mechanisms similar to the constant breadth cam driven linkages, which will be discussed in this study, are also included in Artobolevsky's book.

The aim of this paper is to study the kinematic analysis of different type of constant breadth cam mechanisms and obtain a dwell period for constant breadth cam driven linkages that is impossible for a standard cam mechanism. In this study, firstly, the theory about constant breadth curves is discussed and several constant breadth curves that can be used as cam profiles in constant breadth cam mechanisms are obtained. Then a general kinematic analysis of a constant breadth cam mechanism with translating flat-faced follower was studied with the principle of kinematic inversion. With the results, the kinematic analysis of the constant breadth cam driven four bar and inverted slider crank mechanism were examined in detail. In kinematic analysis, examples related to velocity and acceleration analysis are given after displacement analysis. Similar kinematic analysis can be performed for cam-driven mechanisms with more links.

2. CONSTANT BREADTH CURVES AND SUPPORT FUNCTION

The equation of the family of lines tangent to a continuous, closed and convex planar curve can be written as:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = p(\theta) \quad (1)$$

Here x and y are the coordinates of the tangent point and θ is the angle between the perpendicular side joining the curve center to the tangent and the horizontal side. The function $p(\theta)$ defined in this way is called the support function and gives the length of the said perpendicular [4]–[6].

The curve in question can be defined as the envelope of this line family [20]. If the envelope theory is applied, the parametric equation of the curve will be as follows:

$$x(\theta) = p(\theta) \cos \theta - p'(\theta) \sin \theta \quad (2)$$

$$y(\theta) = p(\theta) \sin \theta + p'(\theta) \cos \theta \quad (3)$$

For a curve to be a constant breadth curve, the perpendicular distance between its tangent at any point and its parallel tangent on the other side of the curve must be the same. (Figure 5). This condition is expressed as:

$$w = p(\theta) + p(\theta + \pi) = \text{constant} \quad (4)$$

Where the w represents the width of a constant breadth curve. The radius of curvature (ρ) must satisfy the following condition to prevent undercutting on a constant breadth curve:

$$\rho = \frac{(x'^2 + y'^2)^{1.5}}{x'y'' - y'x''} > 0 \quad (5)$$

If equations 2 and 3 are substituted in equation 5 and simplified [3], [21]:

$$\rho = p(\theta) + p''(\theta) > 0 \quad (6)$$

In order for this equation to be satisfied, the support function should be as follows [5] or similar trigonometric form:

$$p(\theta) = a \cos^2\left(\frac{k\theta}{2}\right) + b \sin^2\left(\frac{l\theta}{2}\right) + c \quad (7)$$

The a , b , c and k are constants. If $a = b = 0$ and $c \neq 0$ are taken here, the curve becomes a circle. If $b=0$, $k=3$ and $a \neq 0$, $c > 0$, the simplest three-lobed constant breadth curve [4] is obtained. The parameters, $a = 4$, $k = 3$, and $c = 23$ are chosen to be suitable constant breadth curve and be the same width as the other curves. Obtained constant breadth curve from these parameters is given in Figure 1.

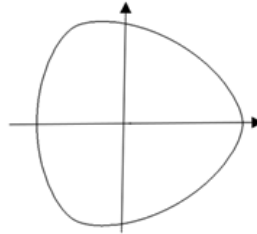


Figure 1. Constant breadth curve

Different forms of constant breadth curves can be obtained by using trigonometric functions. Support functions of four different constant breadth curves are given as an example below. All of these satisfy equations 4 and 5. The curves obtained with trial-and-error method, some symmetrical and others asymmetrical, are shown in Figure 2.

- a. $p(\theta) = \sin 3\theta + \frac{13}{15} \sin 3\theta \cos 2\theta + 25$
- b. $p(\theta) = 2\cos^2 2\theta \sin^3 \theta + 25$
- c. $p(\theta) = 2\sin(\pi \cos \theta) \cdot \cos(\pi \sin \theta) + 25$
- d. $p(\theta) = \sin 2\theta \cos 3\theta + \cos 3\theta + 25$

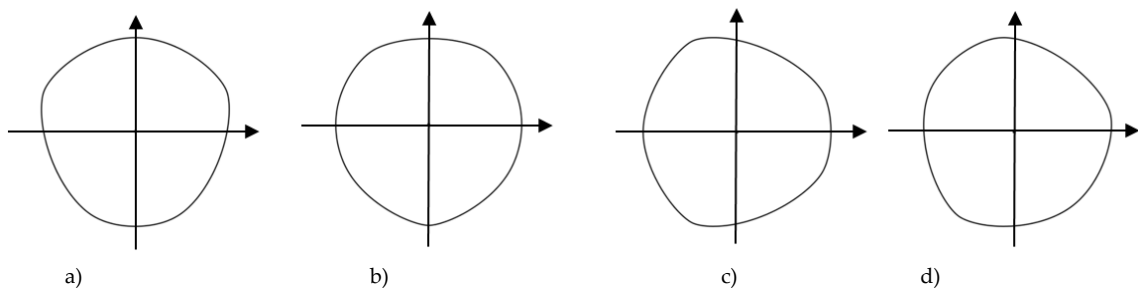


Figure 2. Examples of constant breadth curves used as a constant breadth cam profile

Constant breadth curves can also be expressed by a closed-form polynomial equation [4], [8]. The above parametric expressions are preferred for ease of processing mathematically.

3. CONSTANT BREADTH CAM MECHANISMS

Constant breadth cam mechanisms are generally form closed mechanisms. A constant breadth cam profile can be created in two ways; the first is the Reuleaux triangle method. In this method, the profile is created with circular arcs. The second method uses a suitable constant breadth curve as the cam profile. All of the constant breadth curves mentioned above can be used as cam profiles. In the mechanism, the cam is the actuating member, the member that the cam moves can make a translating movement or an oscillating movement, as in Figure 3. In such a mechanism, it is sufficient that the cam and the 3rd link frame that the cam actuates are tangent at two points in the direction perpendicular to the movement direction; there is no need for contact since there is no movement in the other direction. Thus, a two degree of freedom cam pair is formed, and the total degree of freedom of the mechanism becomes $F=1$ according to the Kutzbach criterion [22].

A constant breadth cam driven linkage can also be formed in a different structure, as in Figure 4. According to the structure of such a four bar mechanism, there will be a mechanism similar to a four bar,

inverted slider crank, or slider crank mechanism. Here, the frame of the 3rd link must be in contact with the constant breadth cam profile from four points in two parallel directions perpendicular to each other, as in Figure 4, because the movement of the 3rd link in both directions is possible. Thus, the cam pair has one degree of freedom, and the total degree of freedom of the mechanism becomes $F=1$ [22]. Here, the perpendicular distances between the parallel tangents must be equal to the constant breadth (w) of the cam in both directions; that is, the frame will be in the form of a square.

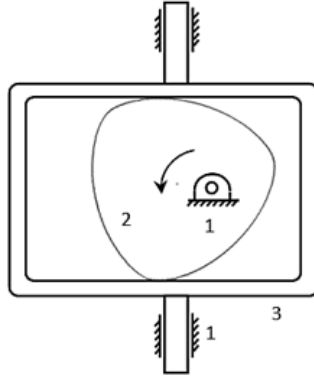


Figure 3. Constant breadth cam mechanism with translating flat-faced follower

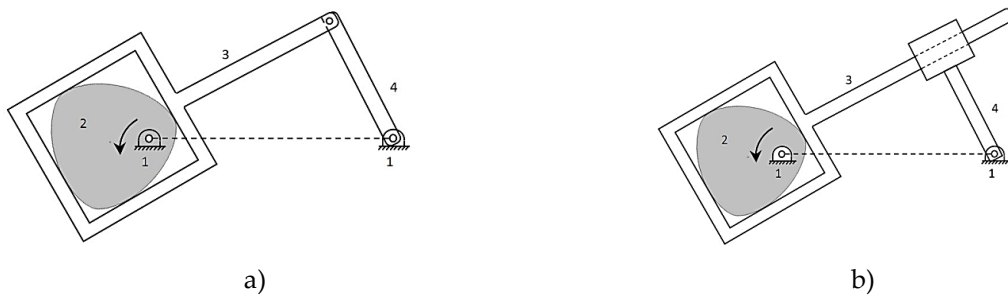


Figure 4. Cam driven mechanisms a) Four bar mechanism b) Inverted slider crank mechanism

In the cam mechanism in Figure 3, the 3rd link, which makes translational movement, is always tangent to the constant breadth cam profile. The kinematic inversion principle can be applied to obtain the displacement equation of this link. For this, considering that the cam is fixed and the 3rd link rotates around it, as seen in Figure 3, the perpendicular distance of the link line tangential to the cam at any position to the cam rotation center (A) will be the linear displacement s of the link.

The slope of the tangent line “ m ” at point P ,

$$m = \frac{dy}{dx} = \frac{dy/d\theta}{dx/d\theta} = \frac{y'}{x'} \quad \text{and the line equation,}$$

$$y = y_t + m(x - x_t) \quad \text{is in the form.}$$

The slope of the perpendicular drawn from the fixed joint $A(x_n, y_n)$ of the cam to the tangent $m \cdot m' = -1$, $m' = -1/m$ and its equation, $y = y_n + m'(x - x_n)$ is in the form.

The intersection point D of these two lines is found from the joint solution of the equations below:

$$x_d = \frac{m^2 x_t + m(y_t - y_n) + y_n}{(1 + m^2)} \quad (8)$$

$$y_d = \frac{m^2 y_n + m(x_n - x_t) + y_t}{(1 + m^2)} \quad (9)$$

at any θ value, the coordinates x_t and y_t and their derivatives x'_t , y'_t are calculated via equations 2 and 3. The linear position “ s ” of 3rd link is equal to the length of AD :

$$s = s(\theta) = \sqrt{(x_d - x_n)^2 + (y_d - y_n)^2} \quad (10)$$

Here, the point coordinates are determined by the axis set at the cam center (Figure 5). Example displacement graphics of the cam profiles in Figure 2 with fixed joint coordinates $x_n=16$ mm and $y_n=7.5$ mm are given in Figure 6.

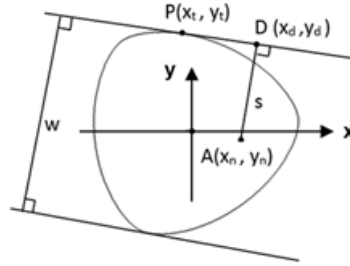


Figure 5. Constant breadth cam and its tangents

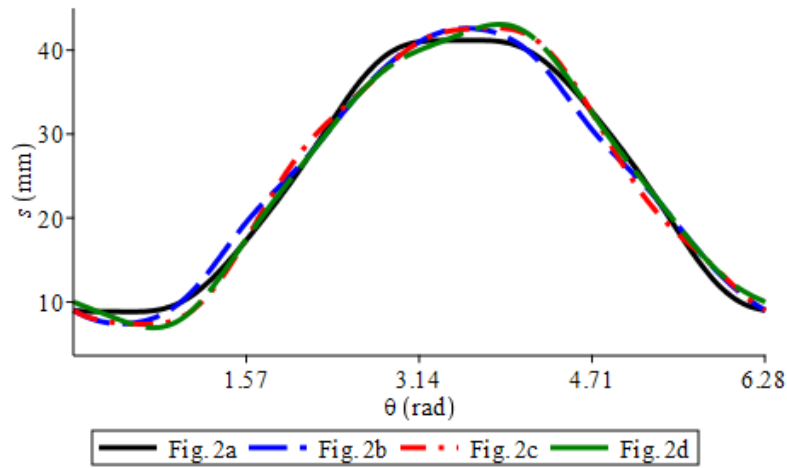


Figure 6. Follower displacement graphs of the constant breadth cam mechanism with translating flat-faced follower in Figure 3

3.1. Constant Breadth Cam Driven Four bar Mechanism

Figure 7 results if the four bar mechanism, the first of the cam driven four bar mechanisms in Figure 4, is drawn schematically at any position of the constant breadth cam. Here, points A, B, and D are the revolute pair centers of the cam, 3rd, and 4th link, respectively. The side length of the square frame of the 3rd link surrounding the cam is equal to the constant breadth of the cam, w . It is assumed that the center of the 34 revolute pair connecting the 3rd and 4th link is connected to this frame perpendicularly from the G, which is the midpoint of the square edge, because this is the most appropriate in terms of the balance of forces and dynamics. Even if the connection is made from a different point, analysis can be made by considering that there is a connection in this way geometrically. Let C be the point where the GD direction intersects the horizontal fixed link line of AB. The perpendicular length drawn from the point A, which is the rotation center of the constant breadth cam, to the other side of the frame is determined by the expression $s(\theta)$ in equation 10. With this direction, $s_1 = w - GF$, which is the perpendicular distance of point F to the other side of the frame, is equal to the perpendicular distance of point A to the same edge, as can be seen from Figure 7, this perpendicular distance is equal to the value $s(\theta + \pi/2)$.

in perpendicular triangle CAF, $CA = \frac{AF}{\sin\theta_3}$ and taking into account the frame geometry,
 $AF = s - 0.5w$, $CF = CA \cos\theta_3$ and $CD = w + r_3 - s_1 + CF$ is written.

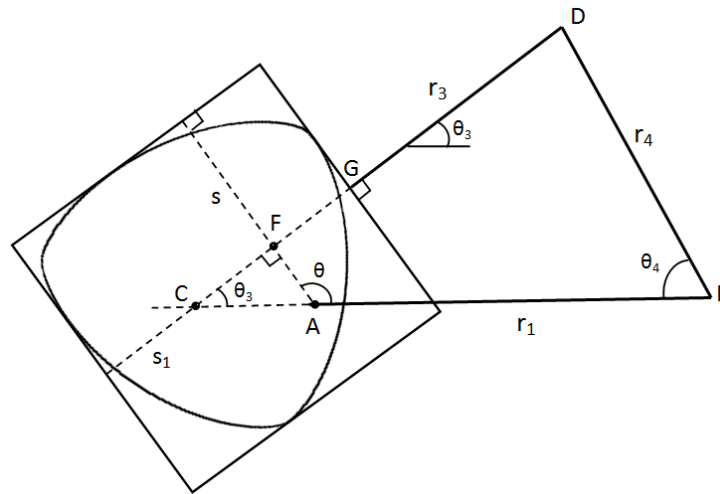


Figure 7. Schematic illustration of a constant breadth cam driven four bar mechanism

If the horizontal and vertical projections of the sides of the CDB triangle are written;

$$r_4 \cos \theta_4 + CD \cos \theta_3 = r_1 + CA \quad (11)$$

$$r_4 \sin \theta_4 = CD \sin \theta_3 \quad (12)$$

If these two expressions are arranged, leaving the r_4 terms on the left and squared and summed side by side, only θ_3 remains in the equations:

$$r_4^2 = CD^2 + (r_1 + CA)^2 - 2CD(r_1 + CA) \cos \theta_3 \quad (13)$$

After equation 13 is arranged, substituting $\tan \frac{\theta_3}{2}$ with t yields a quadratic equation for θ_3 :

$$at^2 + 2bt + c = 0 \quad (14)$$

Here,

$$a = (r_1 + w + r_3 - s_1)^2 + (s - 0.5w)^2 - r_4^2 \quad (15)$$

$$b = 2r_1(s - 0.5w) \quad (16)$$

$$c = (r_1 - w - r_3 + s_1)^2 + (s - 0.5w)^2 - r_4^2 \quad (17)$$

$$\theta_3 = 2 \arctan \left[\frac{-b + \sqrt{b^2 - ac}}{a} \right] \quad (18)$$

For the mechanism configuration to be as in Figure 7, the (+) sign should be used in this expression. The (-) sign indicates reverse configuration. At any value of the cam angle θ , the values $s(\theta)$ and $s_1 = s(\theta + \pi/2)$ be calculated, and the corresponding θ_3 value can be found. If the discriminant is negative, there is no real solution for θ_3 at the θ value, meaning that the mechanism cannot make a full rotation.

In the two positions where the CD direction passes through the fixed joint point A, the mechanism passes through dead-centre positions, where points A and F overlap. In the dead-centre position where point C is to the right of point A, the values of θ and θ_3 are equal; it can be seen from Figure 7 that $\theta = \theta_3 + \pi$ when to the left.

To find the value of θ_4 , arranging equation 12 and substituting $\tan \frac{\theta_4}{2}$ with p ;

$$ep^2 - 2r_4p + e = 0, \quad \text{here,}$$

$$e = [w + r_3 - s_1 + (s - 0.5w)\cot\theta_3]\sin\theta_3 \tag{19}$$

$$\theta_4 = 2\arctan \left[\frac{r_4 - \sqrt{r_4^2 - e^2}}{e} \right] \tag{20}$$

The angular displacements of the links in the mechanism will vary according to the cam and link lengths and the selected cam profile. When the coordinates of the fixed joint are taken as $x_n=18$ mm and $y_n=10$ mm, for the constant breadth cam profile in Figure 1, the mechanism positions are shown in Figure 8 for the cam rotation angle $\theta = 0^\circ$, $\theta = 100^\circ$ and $\theta = 280^\circ$. The link lengths and the constant breadth of the cam are taken as $r_1 = 70$ mm, $r_3 = 65$ mm, $r_4 = 90$ mm and $w = 50$ mm.

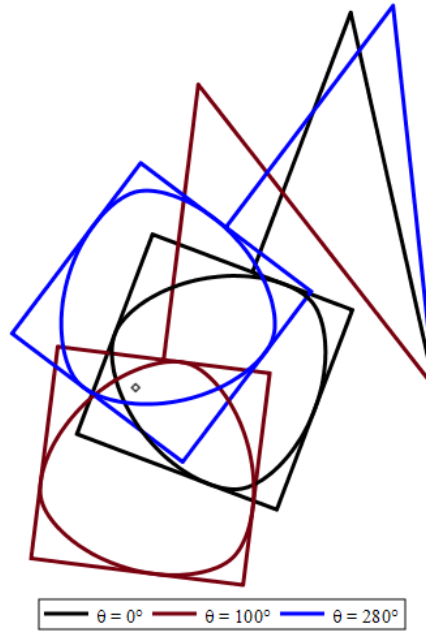


Figure 8. Positions of a constant breadth cam driven four bar mechanism

Taking link lengths $r_1 = 80$ mm, $r_3 = 70$ mm, $r_4 = 105$ mm and fixed joint coordinates $x_n = 18$ mm, $y_n = 8.5$ mm, in the mechanism, graphs showing the change of θ_4 angle with respect to cam angle θ are given in Figures 9a and 9b, respectively, for the cam profile in Figure 1 and some cam profiles in Figure 2 ($w=50$ mm).

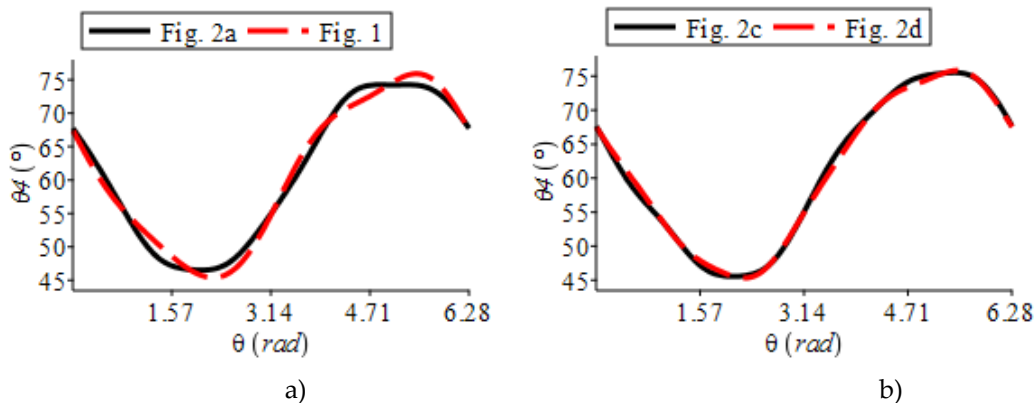


Figure 9. Constant breadth cam driven four bar mechanism a) θ_4 displacement graphs of cam profiles in Figure 1 and 2a b) θ_4 displacement graphs of cam profiles in Figure 2c and 2d

In this type of constant breadth cam driven four bar mechanism, a dwell period can be obtained in the 4th link. If the coordinates of the fixed joint taken as $x_n = 18$ mm and $y_n = 8.5$ mm for the cam profile in Figure 2a in the mechanism given as an example above, a dwell period of approximately 45° occurs around

$\theta = 3\pi/2$ rad in the movement of the 4th link, as seen in the black graph of Figure 9a. It is impossible to achieve such a dwell period in the classical four bar mechanism. This feature also has potential value for the practical use of this constant breadth cam driven mechanism.

The angular velocities of the 3rd and 4th links can be found by taking the derivatives of equations 11 and 12 to cam rotation angle. If the derivative is taken in Equation 12;

$$r_4\omega_4\cos\theta_4 = [-\omega_2s'_1 + \omega_2s' \cot\theta_3 - (s - 0.5w)\omega_3(1 + \cot^2\theta_3)]\sin\theta_3 + [w + r_3 - s_1 + (s - 0.5w) \cot\theta_3] \omega_3\cos\theta_3 \tag{21}$$

here $s' = ds/d\theta$, $s'_1 = ds_1/d\theta$, $\omega_2 = d\theta/dt$, ω_2 is the angular velocity of the cam, which is 2nd link.

In Equation 11, there is also an equation for the angular velocity ω_4 by similarly taking the derivative, and angular velocity expression is obtained from these two equations. Since the expression is long, it is given in Appendix 1.

In these equations, angular acceleration expressions are obtained by taking one more derivative to cam rotation angle. Taken $\omega_2 = 1$ unit, the graphics of said mechanism's angular velocity (ω_4) and angular acceleration (α_4) are given in Figure 10 and 11, respectively.

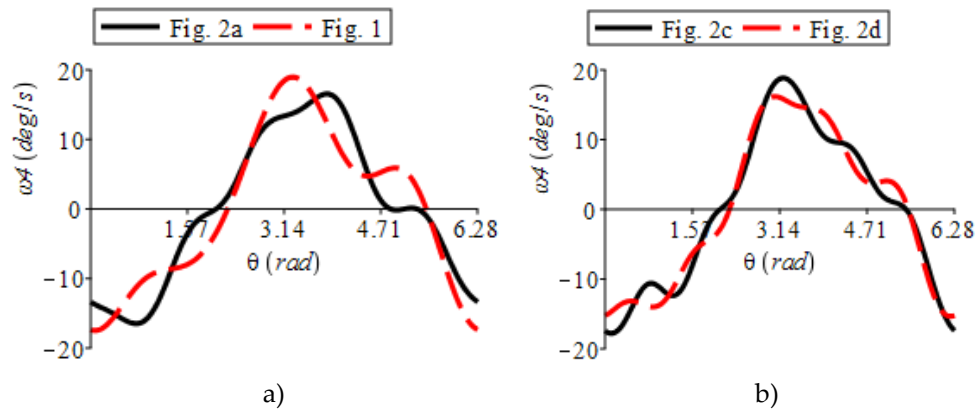


Figure 10. Constant breadth cam driven four bar mechanism a) ω_4 angular velocity graphs of cam profiles in Figure 1 and 2a b) ω_4 angular velocity graphs of cam profiles in Figure 2c and 2d

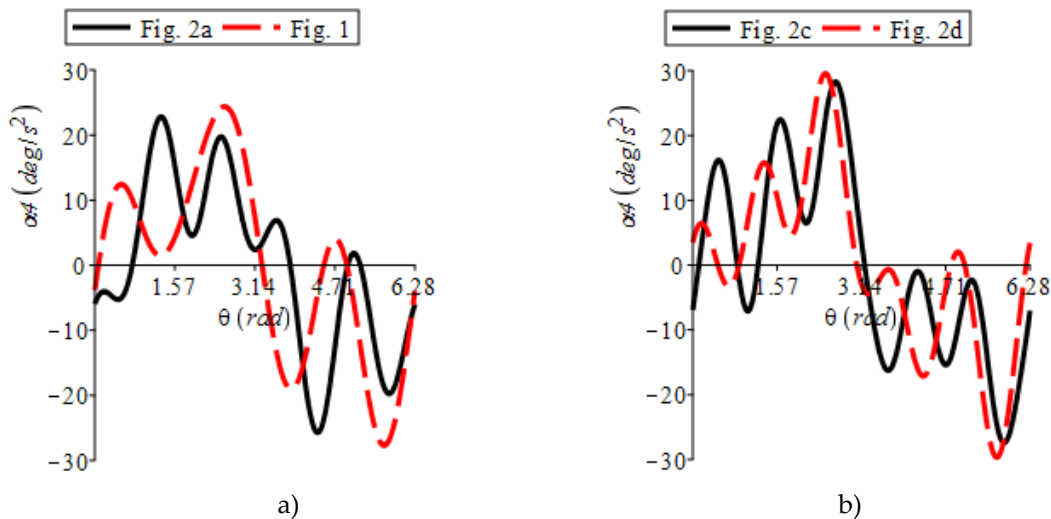


Figure 11. Constant breadth cam driven four bar mechanism a) α_4 angular acceleration graphs of cam profiles in Figure 1 and 2a b) α_4 angular acceleration graphs of cam profiles in Figure 2c and 2d

3.2. Constant Breadth Cam Driven Inverted Slider Crank Mechanism

The structure of the constant breadth cam driven inverted slider crank mechanism is shown in Figure 4b. Here, pair 34 is a prismatic pair, 3rd link makes a sliding motion on the 4th link. Unlike the four bar mechanism above, here the length of 3rd link (r_3) is variable. The schematics of the mechanism are completely similar to that of Figure 7. As in the classical inverted slider crank mechanism, the directions of 3rd and 4th links are always perpendicular to each other, and if this perpendicularity is taken into account in Figure 7, it can be seen that $\theta_3 + \theta_4 = 90^\circ$. In this mechanism, equations 11 and 12 for displacement analysis are written similarly.

If $90 - \theta_4$ is written and edited instead of θ_3 in equation 12;

$$r_4 \sin \theta_4 = [w + r_3 - s_1 + (s - 0.5w)\tan\theta_4]\cos\theta_4 \tag{22}$$

$$r_3 = \frac{r_4 \sin \theta_4 - w\cos\theta_4 + s_1 \cos\theta_4 - s \sin \theta_4 + 0.5w \sin \theta_4}{\cos\theta_4} \tag{23}$$

If the expression r_3 is substituted in equation 11 and simplified;

$$r_1 \cos\theta_4 - r_4 + s - 0.5w = 0 \tag{24}$$

If the $k = \tan \frac{\theta_4}{2}$ transformation used in the solution of trigonometric equations is arranged;

$$fk^2 - g = 0 \text{ , here,} \tag{25}$$

$$f = r_1 - s + 0.5w + r_4, \quad g = r_1 + s - 0.5w - r_4 \tag{26}$$

From equation 25, θ_4 is simply calculated;

$$\theta_4 = 2\arctan\sqrt{g/f} \tag{27}$$

For the configuration of the mechanism to be as in Figure 7, the positive root in equation 25 should be used; the negative root denotes the reverse configuration.

When the coordinates of the fixed joint of the cam profile in Figure 1 are taken as $x_n=12$ mm, $y_n=12$ mm, for the cam rotation angle $\theta = 55^\circ, 120^\circ$ and 230° the mechanism positions are shown in Figure 12. The link lengths and the constant breadth of the cam are taken as $r_1 = 110$ mm, $r_4 = 70$ mm and $w = 50$ mm.

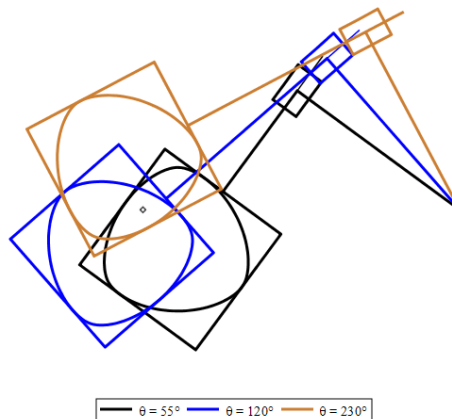


Figure 12. Positions of constant breadth cam driven inverted slider crank mechanism

Taking link lengths $r_1 = 130$ mm, $r_4 = 70$ mm and fixed joint coordinates $x_n = 18.5$ mm, $y_n = 8.5$ mm in the mechanism, graphs showing the change of θ_4 angle with respect to cam angle θ are given in Figures 13a and 13b, respectively, for the cam profile in Figure 1 and some cam profiles in Figure 2. ($w=50$ mm)

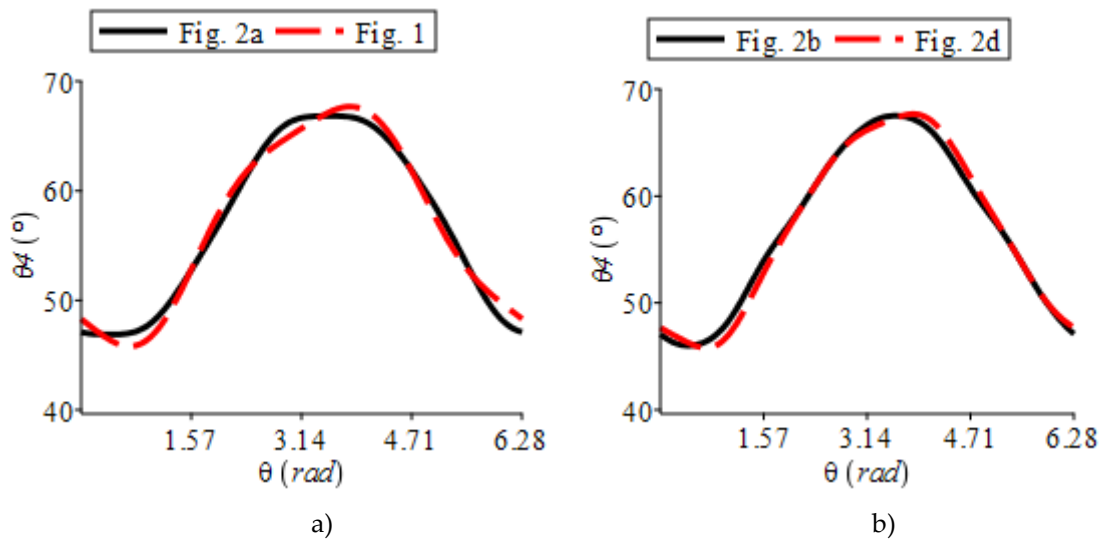


Figure 13. Constant breadth cam driven inverted slider crank mechanism a) θ_4 displacement graphs of cam profiles in Figure 1 and 2a b) θ_4 displacement graphs of cam profiles in Figure 2b and 2d

As with the constant breadth cam driven four bar mechanism, the constant breadth cam driven inverted slider crank mechanism can be obtained dwell period. If the coordinates of the fixed joint taken as $x_n = 18.5$ mm and $y_n = 8.5$ mm for the cam profile in Figure 2a in the mechanism given as an example above, a dwell period of approximately 40° occurs around $\theta = \pi$ rad in the movement of the 4th link, as seen in the black graph of Figure 13a.

In Equation 24, the angular velocity expression (ω_4) of 4th link can be found simply by taking the derivative to cam rotation angle:

$$r_1 \omega_4 (-\sin \theta_4) + s' \omega_2 = 0, \tag{28}$$

here, $s' = ds/d\theta$, $\omega_2 = d\theta/dt$, ω_2 is the angular velocity of the cam.

$$\omega_4 = s' \omega_2 / (r_1 \sin \theta_4) \tag{29}$$

Here, by taking $\omega_2 = 1$ unit, which is, normalizing according to ω_2 , the angular velocity graphs of ω_4 for the above mentioned mechanism are given as an example in Figure 14, respectively.

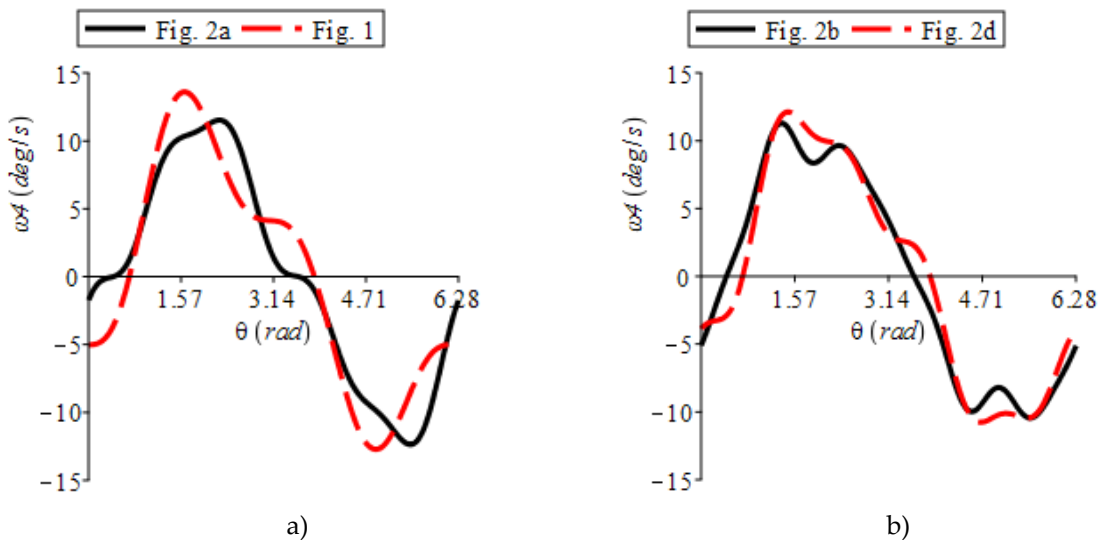


Figure 14. Constant breadth cam driven inverted slider crank mechanism a) ω_4 angular velocity graphs of cam profiles in Figure 1 and 2a b) ω_4 angular velocity of cam profiles in Figure 2b and 2d

If the angular velocity of the cam ω_2 is assumed to be constant and the derivative is taken once more with respect to cam rotation angle in equation 28, the angular acceleration expression of 4th link (α_4) is found:

$$r_1\alpha_4(-\sin\theta_4) + (r_1\omega_4^2\cos\theta_4) + s''\omega_2^2 = 0 \quad (30)$$

here, $s'' = d^2s/d\theta^2$

$$\alpha_4 = (s''\omega_2^2 - r_1\omega_4^2\cos\theta_4)/(r_1\sin\theta_4) \quad (31)$$

By taking $\omega_2 = 1$ unit α_4 angular acceleration graphs for the above mechanism are given as an example in Figure 15, respectively.

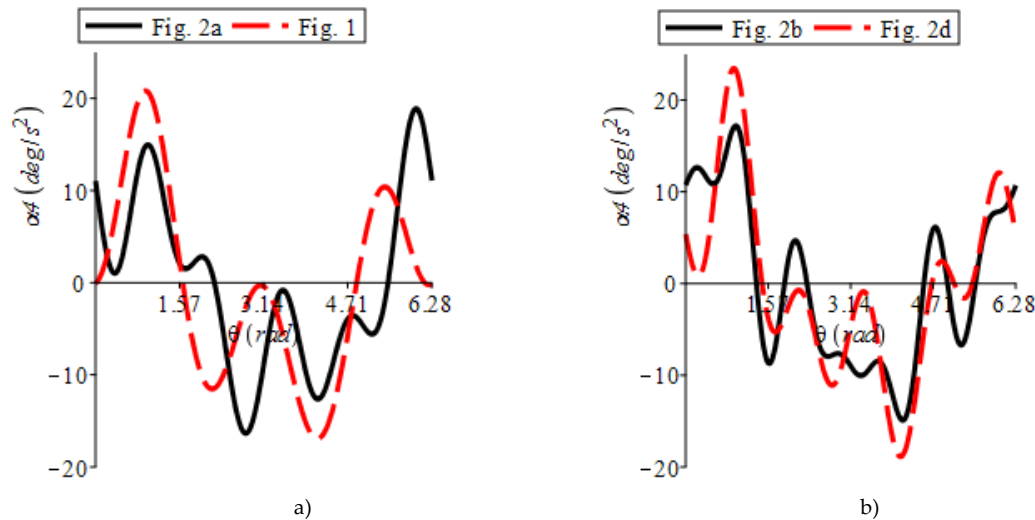


Figure 15. Constant breadth cam driven inverted slider crank mechanism a) α_4 angular acceleration graphs of cam profiles in Figure 1 and 2a b) α_4 angular acceleration of cam profiles in Figure 2b and 2d

Analysis of a constant breadth cam driven slider crank mechanism with a similar construction can be done in a similarly.

Nomenclature can be found in Appendix 2.

4. CONCLUSION AND DISCUSSION

There are many studies on constant breadth cam mechanisms. The vast majority of existing studies are also related to Reuleaux type mechanisms. A method based on hypocycloid geometry was used in the kinematic analysis of the hypocycloid-based constant breadth cam mechanism, which was considered together with the Reuleaux type cam mechanism. In this study, a general method valid for all constant breadth cam profiles and cam driven linkages is presented. This method can be applied similarly in such linkages that have more links.

As shown by the examples here, different motions with different characteristics can be obtained with different constant breadth cam profiles. Also, the motion profile can be changed by changing the location of the fixed joint of the cam profile. It is also possible to obtain dwell motion with appropriate lengths in the mechanism.

Declaration of Ethical Standards

The authors mentioned in the manuscript have agreed for authorship, read and approved the manuscript, and given consent for submission and subsequent publication of the manuscript.

Credit Authorship Contribution Statement

Mert Eren AYĞAHOĞLU: The author has done research, analysis and writing.

Ziya ŞAKA: The author has done conceptualization, review and editing.

Declaration of Competing Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding / Acknowledgements

The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

APPENDICES

Appendix 1

The formulation of the angular velocity ω_4 of an exemplary constant breadth cam driven four bar mechanism is given below from the derivatives of equations 11 and 12 to cam rotation angle :

$$\omega_4 = \frac{[(w+r_3-s_1)s'_1+(0.5w-s)s']\sin(\theta_3-\theta_4)}{r_4[(w+r_3-s_1)(\sin^2\theta_4-\sin^2\theta_3)+0.5(s-0.5w)(\sin 2\theta_4-\sin 2\theta_3)]}\omega_2 \quad (34)$$

Appendix 2

Table 1. Nomenclature

θ_i	Rotation angle
s	Displacement of follower
s_1	The distance s rotated by 90°
$p(\theta)$	Support function
ρ	Radius of curvature
x_n	x coordinate of fixed joint
y_n	y coordinate of fixed joint
r_i	Link length
w	Constant breadth of the cam
m	The slope of the tangent line
m'	The slope of the perpendicular to the tangent

REFERENCES

- [1] J. Yu, H. Luo, J. Hu, T. V. Nguyen, and Y. Lu, "Reconstruction of high-speed cam curve based on high-order differential interpolation and shape adjustment," *Appl Math Comput*, vol. 356, pp. 272–281, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.amc.2019.03.049.
- [2] H. A. Rothbart, "Cam Design Handbook: Dynamics and Accuracy," 2004, doi: 10.1036/0071433287.
- [3] H. Martini, L. Montejano, and D. Oliveros, *Bodies of Constant Width*. Cham: Birkhäuser, 2019.
- [4] S. Rabinowitz, "A Polynomial Curve of Constant Width," *MathPro Press*, vol. 9, pp. 23–27, 1997.
- [5] H. Lu, "Plane curve of constant width research," 2001.
- [6] T. Bayen and J.-B. Hiriart-Urruty, "Convex objects of constant width (in 2D) or thickness," *Annales des sciences mathématiques du Québec*, pp. 17–42, 2017.

- [7] H. L. Resnikoff, "On Curves and Surfaces of Constant Width," Apr. 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1504.06733>
- [8] A. David Irving, "Curves of Constant Width & Centre Symmetry Sets," 2006.
- [9] C. Panraksa and L. C. Washington, "Real algebraic curves of constant width," *Period Math Hung*, vol. 74, no. 2, pp. 235–244, Jun. 2017, doi: 10.1007/s10998-016-0149-9.
- [10] L. Paciotti, "Curves of Constant Width and Their Shadows," 2010.
- [11] S. G. Dhande and Rajaram N., "Kinematic Analysis of Constant-Breadth Cam-Follower Mechanisms," *Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design*, no. 106, pp. 214–221, 1984, [Online]. Available: <https://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org>
- [12] Jinjiang Z., "Research on flat surface and constant width curve," 2001.
- [13] G. Figliolini and P. Rea, "Reuleaux Triangle and its Derived Mechanisms."
- [14] Yüzbaşı Ş. and Karaçayır M., "A Galerkin-like scheme to determine curves of constant breadth in Euclidean 3-space," *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, vol. 11, no. 3, pp. 646–658, 2021, [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0001-6230-3638>.
- [15] H. Satoshi and T. Shun, "Development of a reduction mechanism integrated with a constant-breadth cam," in *Proceedings of JSPE Semestrial Meeting*, 2017.
- [16] L. Wang, W. Zhang, C. Wang, F. Meng, W. Du, and T. Wang, "Conceptual Design and Computational Modeling Analysis of a Single-Leg System of a Quadraped Bionic Horse Robot Driven by a Cam-Linkage Mechanism," *Appl Bionics Biomech*, 2019, doi: 10.1155/2019/2161038.
- [17] M. Asgari, E. A. Phillips, B. M. Dalton, J. L. Rudl, and D. L. Crouch, "Design and Preliminary Evaluation of a Wearable Passive Cam-Based Shoulder Exoskeleton," *JOURNAL OF BIOMECHANICAL ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME*, vol. 144, no. 11, 2022, doi: 10.1115/1.4054639.
- [18] E. E. Zayas-Figueras and I. Buj-Corral, "Comparative Study about Dimensional Accuracy and Surface Finish of Constant-Breadth Cams Manufactured by FFF and CNC Milling," *Micromachines (Basel)*, vol. 14, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/mi14020377.
- [19] Artobolevsky I. I., *Mechanisms in Modern Engineering Design, A Handbook for Engineers, Designers and Inventors, Volume IV: Cam and Friction Mechanisms Flexible-Link Mechanisms*. Moscow: Mir Publishers, 1977.
- [20] V. I. Smirnov, "CHAPTER I ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS," in *A COURSE OF Higher Mathematics*, vol. 2, PERGAMON PRESS, 1964, pp. 32–36.
- [21] K. J. Waldron, G. L. Kinzel, and A. S. K., *Kinematics, Dynamics, and Design of Machinery*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [22] E. Söylemez, *Mechanisms*. METU Publications, 1986.



ATIK ÇİNKO CÜRUF TOZU KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN TAZE BETON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

^{1*} Türkay KOTAN , ²Metehan ARDAHANLI , ³Ömer Furkan ÖZBEY 

^{1,2} Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum,
TÜRKİYE
³Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, TÜRKİYE
¹ turkay.kotan@erzurum.edu.tr, ² metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr, ³ omer.ozbey56@erzurum.edu.tr

Önemli Katkıları (Highlights)

- Kendiliğinden yerleşen betonların özelliklerine atık çinko cüruf tozu katkısının etkisi incelenmiştir.
- Atık çinko cüruf tozu katkılı kendiliğinden yerleşen betonların basınç dayanımları, katkısız betonların basınç dayanım sonuçlarına yaklaşık eşdeğer olarak bulunmuştur.
- Atık çinko cüruf tozunun kendiliğinden yerleşen betonların üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir.
- Belirli oranlarda çimento yerine atık çinko cüruf tozu katkısının kullanımı ile hem kendiliğinden yerleşen betonların maliyetleri azalacak hemde çevreci bir beton elde edilebilir.



ATIK ÇİNKO CÜRUF TOZU KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN TAZE BETON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

^{1*}Türkay KOTAN , ²Metehan ARDAHANLI , ³Ömer Furkan ÖZBEY 

^{1,2}Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE

³Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, TÜRKİYE

¹turkay.kotan@erzurum.edu.tr, ²metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr, ³omer.ozbey56@erzurum.edu.tr

(Geliş/Received: 15.09.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.04.2023)

ÖZ: Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) yüksek işlenebilirliğe sahip, vibrasyon işlemi gerektirmeyen ve donatı sıklığının fazla olduğu kalıplarda kolayca yerleşebilen bir özel beton türüdür. KYB'lerin kullanımı günümüzde gittikçe yaygınlaşmakta olup özellikle bu tür betonlarda kullanılan yüksek çimento dozajını azaltarak maliyeti düşürmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Betonun en yüksek maliyetli bileşeni olan çimentonun bir kısmının yerine atık ürünler kullanılması bu çalışmaların başında gelmektedir. Bu çalışmada, atık çinko cüruf tozu çimentonun yerine ağırlıkça %5, 7.5 ve 10 oranında kullanılmış olup, üretilen KYB'lerin taze beton özellikleri ile 7 ve 28 gün standart kür sonunda basınç dayanımı sonuçları incelenmiştir. Taze beton deneyleri olarak; yayılma deneyi, V-hunisi deneyi, L-kutusu deneyi ve U-kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, atık çinko cüruf tozunun KYB taze beton özelliklerini iyileştirebildiği görülmüş olup, bu malzemenin kullanılması ile üretilen KYB betonlarının yüksek dayanıma ve kontrol betonuna eş değer basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Beton, Atık Çinko Cürufu, Taze Beton Özellikleri, Basınç Dayanımı

Investigation of Fresh Concrete and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Waste Zinc Slag Admixture

ABSTRACT: Self-compacting concrete (SCC) is a special type of concrete that has high workability, does not require vibration and can easily settle in molds where reinforcement density is high. The use of SCCs is becoming more and more widespread in our day, and many studies are being carried out to reduce the cost, especially by reducing the high cement dosage used in this type of concrete. The use of waste products instead of the part of cement, which is the most costly component of concrete, is at the forefront of these studies. In this study, the waste zinc slag powder was used instead of cement at a rate of 5, 7.5 and 10% by weight, and the properties of fresh concrete and compressive strength results at the end of 7 and 28-days of standard curing of the produced SCCs were investigated. As fresh concrete experiments; slump-flow test, V-funnel test, L-box test and U-box test were performed. When the results were examined, it was seen that waste zinc slag powder could improve the fresh concrete properties of SCC, and it was determined that SCC concretes produced by using this material had high strength and compressive strength equivalent to control concrete.

Keywords: Self-compacting Concrete, Waste Zinc Slag, Fresh Concrete Properties, Compressive Strength

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kendiliğinden yerleşebilirlik kavramı ilk olarak 1986 yılında Tokyo'da Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından ortaya çıkmıştır [1]. Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) sahip olduğu; vibrasyon gerektirmemesi, en sık donatı aralıklarından kolayca geçebilmesi ve segregasyon yapmadan kolayca yerleşebilmesi gibi birçok avantajı sayesinde son zamanlarda tercih sebebi olmuştur [2]-[4]. Bu avantajlarının getirdiği temel sonuç ise boşluksuz beton üretimidir [5]. KYB'lerin sahip olduğu 2 önemli özellik dikkat çekmektedir; bunlardan ilki yüksek ince malzeme miktarına sahip olmaları, ikincisi ise üretiminde yüksek oranda su azaltan süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasıdır. Bu iki önemli özellik KYB'lerin düşük su/çimento oranına sahip olmasını ve dolayısıyla yüksek performanslı beton grubuna girmesini sağlar [6]-[8].

Beton bileşenleri içerisinde maliyeti en yüksek olan malzeme çimentonun, KYB'lerde yüksek dozajlarda kullanılması, bu tür özel betonların maliyetinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu sebeple KYB üretiminde çeşitli atık maddeler öğütülüp çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda ikame olarak kullanılarak hem maliyetin düşürülmesi hem de kullanılan malzemenin yeterli performansı sağlaması istenir. Bu malzemeler çoğunlukla yapay puzolan olarak adlandırılan mineral katkılardır [9]-[12]. Bu mineral katkıların KYB'lerde kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur;

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu 3 farklı oranda (%20, 40 ve 60) çimentoya ikame edilerek oluşturulan kendiliğinden yerleşen betonlarda kapilarite ve basınç dayanımı incelendiğinde, uçucu kül ikamesi kapilarite katsayısı üzerinde anlamlı bir etki oluşturmazken, yüksek fırın cürufu ikame oranının artması kendiliğinden yerleşen betonların kapilarite katsayılarının önemli düzeyde düşmesine neden olmuştur ve en yüksek basınç dayanımı %20 oranında ikamesi ile elde edilmiştir [13]. Ayrıca uçucu külün kendiliğinden yerleşen betona etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada, çimento yerine %20 oranında uçucu kül kullanılmasının dayanım açısından optimum sonuçları vereceği tespit edilmiştir [14]. Farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül (UK) içeren kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlarına karışım süresinin etkisi incelendiğinde, karışım oranları çok iyi ayarlanmış dahi olsa, karıştırma süresi 3 (dakika/45 litre) değerinden fazla olduğu zaman taze betonda ayrışma olduğu sonucuna varılmıştır [15]. Mineral katkı maddesi olarak çimento yerine ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında silis dumanı ve %25, 40 ve 55 oranlarında F tipi uçucu kül kullanılarak üretilen KYB üretiminde en yüksek basınç dayanımı değeri 88 MPa değeri ile %15 silis dumanı kullanılarak üretilen betonlardan elde edilirken [16], çimento yerine %40, 50, 60 oranlarında F tipi uçucu kül ikame edilmesi sonucunda en iyi akıcılık ve en iyi basınç dayanımı %40 oranında olduğu görülmüştür [17]. İki farklı kür şartı ve farklı oranlarda silis dumanı (%10, 15, 20) ile uçucu kül (%10, 20, 30, 40, 50) ikamesi ile ayrı olarak ve hibrit şeklinde üretilen KYB'lerde sadece uçucu kül kullanarak elde edilen KYB'lerde en yüksek dayanımın %30 oranında, sadece silis dumanı kullanılarak elde edilen KYB'lerde ise en yüksek dayanımın %15 oranında ve 28 gün su küründe uçucu küldeki optimum dayanım değerinin silis dumanındaki optimum değerden daha düşük olduğu, hibrit oran olarak %10 uçucu kül+%10 silis dumanı ikamesi ile elde edilen KYB'lerde en yüksek hibrit dayanımın elde edildiği gözlemlenmiştir [18]. Çelik cürufunun çimento yerine %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında kullanılarak üretilen KYB'lerin taze beton ve sertleşmiş beton özellikleri incelendiğinde çelik cürufunun %15 oranına kadar kullanımının KYB'lerde olumlu etki gösterdiği [19] ve çelik cürufunun KYB tokluk ve yorulma direncini artırdığı [20] belirlenmiştir. Ayrıca bakır cürufunun KYB'lerde basınç dayanımını artırdığı [21] ve KYB taze beton özelliklerini iyileştirdiği [22] görülmüştür.

Sanayi sektörü başta olmak üzere çeşitli alanların üretilmesinde, yapıların çatı kaplama işlerinde, lastik ve pil gibi malzemelerinin üretimi gibi birçok alanda çinko metali kullanılmaktadır. Çinko metalinin ülkemizde rezervi 2.3 milyon iken dünyada bu değer 200 milyon seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Başta ABD olmak üzere Kanada, Çin ve Avustralya çinko rezervi açısından en zengin ülkelerdir. Dünyada bu rezervlerden 8 milyon ton üretim yapılırken bunun 0.5 tonu atık çinko cürufu olarak ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde ise çinko metalinin tüketim seviyesi yüksek değerlerde olup yaklaşık olarak 60 bin tondur. Her geçen gün sanayi sektörünün artışına bağlı olarak bu değerler artmaktadır. Türkiye'de çinko yatakları çoğunlukla kurşun-çinko yatağı olarak Doğu Karadeniz Bölgesi'nde (Şekil 1) yaygın olarak bulunmaktadır [23].



Şekil 2. Atık Çinko Cürufu

Figure 2. Waste Zinc Slag

Çizelge 1. Çimento ve Atık Çinko Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Table 1. Chemical Properties of Cement and Waste Zinc Slag

Kimyasal Bileşenler	Çimento (%)	Atık Çinko Cürufu (%)
SiO ₂	18.10	16.10
Al ₂ O ₃	4.48	8.53
Fe ₂ O ₃	3.09	26.47
CaO	63.65	29.83
MgO	2.58	3.22
SO ₃	2.84	-
Kızdırma Kaybı	3.9	11.10
Na ₂ O	0.21	-
K ₂ O	0.62	-
Na ₂ O+0.66K ₂ O	0.62	-
Cl	0.015	-
Ölçülemeyen	0.52	-
Toplam	100	-
Serbest CaO	0.44	-
Çözülemeyen Miktar	0.55	-

Çizelge 2. Bazalt Agregasının Fiziksel Özellikleri

Table 2. Physical Properties of Basalt Aggregate

Agrega Boyutu (mm)	DKY Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)	Su Emme Oranı (%)	Stok Nemi (%)
0-2	2.61	2.98	2.59
2-4	2.61	2.95	2.39
4-8	2.63	1.40	1.49
8-16	2.63	1.47	1.17

Çizelge 3. Çinko Cürufunun Fiziksel Özellikleri*Table 3. Physical Properties of Zinc Slag*

Cüruf Boyutu (mm)	DKY Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)	Su Emme Oranı (%)
0-4	2.22	10.2
4-8	2.23	9.5

Los Angeles cihazı yardımıyla öğütülen atık çinko cürufu malzemesinin, 63 mikron ve 75 mikron boyutunda kare gözlü eleklerden geçen yüzdesi Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Atık Çinko Cürufunun İnceliği*Table 4. Fineness of Waste Zinc Slag*

Elek Çapı (mikron)	Elekten Geçen (%)
75	85
63	60

2.2. KYB Karışım Grupları (KYB Mixture Groups)

Polikarboksilik eter esaslı 2. nesil süper akışkanlaştırıcı çimento ağırlığına %2.63 oranında kullanılarak oluşturulan KYB karışım grupları Çizelge 5’de verilmiştir. Uygun ve doğru akışkanlaştırıcı oranı için birçok ön deneme yapılmıştır. KYB karışım grupları; kontrol grubuna ek olarak atık çinko cürufunun çimento yerine ağırlıkça %5, 7.5 ve 10 oranlarında kullanılması ile oluşturulmuştur.

Çizelge 5. KYB Karışım Grupları*Table 5. KYB Mixture Groups*

KYB Grupları	Malzeme Miktarı (kg/m ³)								
	Ç	ÇC	Agrega (mm)				S	S/B	SA
			0-2	2-4	4-8	8-16			
K	578	-	568	353	308	307	208	0.36	15.2
ÇC5	549	29	568	353	308	307	208	0.36	15.2
ÇC7.5	535	43	568	353	308	307	208	0.36	15.2
ÇC10	520	58	568	353	308	307	208	0.36	15.2

K: Kontrol KYB Grubu, Ç: Çimento, ÇC: Çinko Cürufu S: Su, S/B: Su/Bağlayıcı Oranı, SA: Süperakışkanlaştırıcı

2.3. Yöntem (Method)

2.3.1. Taze beton deneyleri (Fresh Concrete Tests)

2.3.1.1. Yayılma deneyi (Flow-table test)

KYB’nin yayılma deneyinde, taze betonun kendi ağırlığı ile yayılma çapı ve T50 süresi belirlenir. Bu deneyde, düz bir yüzey üzerinde slump hunisine doldurulan KYB’nin, huni çekildikten sonra yayılabildiği maksimum çap ile 50 cm dairesel çap ölçüsüne yayılma süresi belirlenir. Deney (Şekil 3) TS EN 12350-8 [30] standardına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 3. Yayılma Deneyi

Figure 3. Flow-Table Tests

2.3.1.2. V-Hunisi deneyi (V-Funnel Flow test)

V-hunisi deneyi (Şekil 4), KYB'nin boşluklardan geçebilme kabiliyetini ölçmek için kullanılır. Bu deneyde, KYB'nin kendi ağırlığı ile V-hunisinin dar olan kısmından boşaldığı süre ölçülür. Deney TS EN 12350-9 [31] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. V Hunisi Deneyi

Figure 4. V-Funnel Flow Test

2.3.1.3. L-Kutusu deneyi (L-Box Test)

KYB'nin donatılar arasındaki geçiş ve kalıba kendiliğinden yerleşme yeteneğini ölçmek için uygulanır. Deneyde, (Şekil 5) sürgülü kapak açıldıktan sonra L-kutusunun her iki ucundaki yükseklikler ölçülerek aradaki fark tespit edilir. Deney TS EN 12350-10 [32] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. L-Kutusu Deneyi

Figure 5. L-Box Test

2.3.1.4. U-Kutusu deneyi (U-Box test)

Taze durumdaki KYB'nin, donatılar arasından kendi ağırlığı ile geçebilme yeteneğinin belirlendiği deney (Şekil 6) yöntemidir. Bu deneyde, U-kutusunun iki bölmesi arasındaki sürgülü kapak kapalı durumda iken, bir bölmesine doldurulan ve kapağın açılmasıyla diğer bölmede yükselen KYB'nin iki bölmedeki yükseklik farkı ölçülür.



Şekil 6. U-Kutusu Deneyi

Figure 6. U-Box Test

2.3.2. Sertleşmiş beton deneyi (Hardened concrete test)

2.3.2.1. Basınç dayanımı deneyi (Compressive strength test)

Basınç dayanımı deneyi 150×150×150 mm boyutlu numunelerde 7 ve 28 gün standart kür sonunda TS EN 12390-3 [33] standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde, standarda uygun olarak yükleme hızı 0.4 MPa/s olarak alınmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Basınç Dayanımı Deneyi
Figure 7. Compressive Strength Test

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları (Fresh Concrete Test Results)

Farklı oranlarda atık çinko cüruf tozu ikameli KYB gruplarına ait taze beton deney sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. KYB Taze Beton Deney Sonuçları
Table 6. KYB Fresh Concrete Test Results

KYB Taze Beton Özellikleri	KYB Karışım Grupları				
	Birim	K	ÇC5	ÇC7.5	ÇC10
Yayılma Çapı	cm	90	94	98	86
T-50 Süresi	s	2.25	1.92	1.64	2.25
V Hunisi Süresi	s	5.36	3.91	4.98	4.2
L Kutusu Yükseklik Oranı (h1/h2)	-	1.13	1.11	1.08	1.10
U Kutusu Yükseklik Farkı (h1-h2)	cm	1	0.5	0.6	0.8

K: Kontrol, ÇC: Çinko Cürufu

Çizelge 6 incelendiğinde, atık çinko cüruf tozu ikameli KYB gruplarının yayılma çapı değerlerinin yüksek olduğu ve en yüksek yayılma çapının 98 cm ile ÇC7.5 KYB grubunda elde edildiği belirlenmiştir. EFNARC [34] standardına göre KYB betonlarının minimum 65 cm yayılma çapına sahip olması gerektiği belirtilmektedir. Elde edilen en yüksek yayılma çapının ise minimum yayılma çapından %51, kontrol KYB betonundan ise %9 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yayılma çapının en yüksek çıktığı ÇC7.5 KYB grubunun T-50 süresi en az çıkmış ve bu durum atık çinko cürufu malzemesinin kullanıldığı KYB'lerin, kendi ağırlığı ile yayılma çaplarının artacağı ve yayılma sürelerinin ise azalacağı sonucunu ortaya koymuştur. Ağırlıkça çimento yerine %7.5 oranında kullanılan atık çinko cürufunun %10 oranına çıkması ile yayılma çapı ve T-50 süresi azalmış iken KYB'lerin taze beton özellikleri için olumsuz durum olan L Kutusu Yükseklik Oranı (h1/h2) ve U Kutusu Yükseklik Farkı (h1-h2) ise artış göstermiştir. Atık çinko cürufunun sahip olduğu yüksek su emme oranları nedeniyle betonda kullanım oranının artışına bağlı olarak işlenebilirliği olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

Atık çinko cürufu içeren KYB'lerdeki V-hunisi deneyi süreleri, L-kutusu yükseklik oranı ve U-kutusu yükseklik farkı miktarı kontrol KYB grubuna göre daha düşük çıkmıştır. Bu deney sonuçlarının kontrol KYB grubuna göre düşük çıkması, KYB için istenilen bir sonuçtur [16].

Atık çinko cüruf tozu içeren KYB grupları bütün KYB taze beton deneylerinde olumlu sonuç vermiş olup, bu atık malzemenin KYB tasarımlarında kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Atık çinko cüruf tozunun KYB'lerde kullanılması ile işlenebilirliği artırabileceği belirlenmiştir. Puzolanik katkıların işlenebilirliği olumlu etkilediği bilinmektedir [18], [35]. Bu durum atık çinko cüruf tozunun KYB'lerin taze beton özelliklerinde bir puzolan katkısı gibi çalışabileceğini ortaya koymaktadır.

3.2. Sertleşmiş Beton Deneyi Sonuçları (Hardened Concrete Test Results)

3.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçları (Compressive Strength Results)

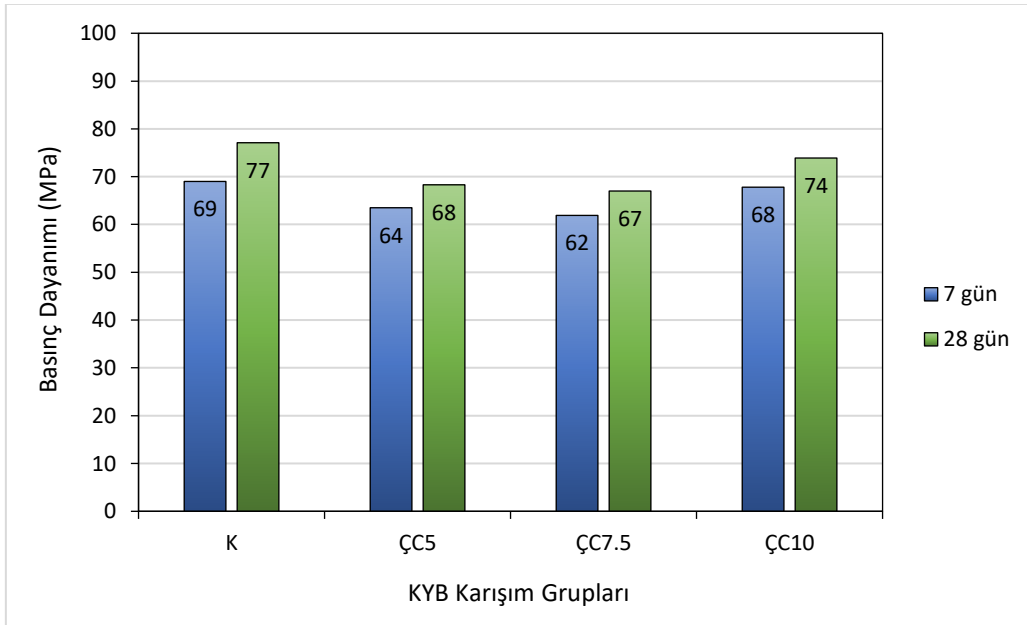
Atık çinko cüruf tozu katkılı ve kontrol KYB gruplarına ait 7 ve 28 gün standart su kürü sonunda, her bir gruba ait üçer adet numuneden elde edilen ortalama basınç dayanım sonuçları Çizelge 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

Çizelge 7. Basınç Dayanımı Sonuçları

Table 7. Compressive Strength Results

KYB Grupları	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	
	7 Gün	28 Gün
K	69	77
ÇC5	64	68
ÇC7.5	62	67
ÇC10	68	74

K: Kontrol, ÇC: Çinko Cürufu



Şekil 8. Basınç Dayanımı Sonuçları

Figure 8. Compressive Strength Results

Çizelge 7 ve Şekil 8 incelendiğinde, 7 ve 28 gün standart kür sonunda atık çinko cüruf tozu ikameli KYB karışım gruplarının basınç dayanım sonuçları, her iki kür süresinde de kontrol grubu dayanım sonuçlarına yaklaşık eş değer olduğu görülmektedir.

Atık çinko cüruf tozu katkı KYB gruplarında, her iki kür süresinde de en yüksek basınç dayanımları ÇC10 grubunda elde edilmiştir. Atık çinko cüruf lu gruplarda, 7 gün standart kür sonunda minimum 62 MPa, 28 gün standart kür sonunda minimum 67 MPa basınç dayanımı elde edilmiş olup, atık çinko cüruf tozu ikamesi ile yüksek dayanımlı KYB'lerin elde edilebileceği belirlenmiştir. Atık çinko cüruf tozunun kimyasal bileşiminde yer alan SiO_2 miktarının kullanılan çimento ile yakın olması ve sahip olduğu kimyasal özellikler sayesinde ($CaO > \%10$ ve $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > \%50$) C tipi uçucu kül gibi kendiliğinden bağlayıcılık özelliklerine sahip olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle ilk zamanlarda (7 gün kür süreli) atık çinko cüruf tozu içeren KYB'lerin basınç dayanımı sonuçları referans KYB'nin basınç dayanımı sonuçlarına yakın olarak elde edilmiştir. Çinko cüruf katkısının artışına bağlı olarak, 28 gün standart kür sonunda basınç dayanımları 74 MPa seviyelerine ulaşmış olup, bu durum atık malzemenin KYB içerisinde puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilmesini göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, atık çinko cüruf malzemesinin bir özel beton türü olan KYB üretiminde kullanılabilirliği incelenmiş ve bu kapsamda çimento yerine ağırlıkça 3 farklı oranda (%5, 7.5 ve 10) ikame edilerek karışım grupları oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında, taze beton deneylerine ek olarak, üretilen numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar özetle;

- Atık çinko cüruf tozunun KYB üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir.
- Üretilen tüm atık çinko cüruf tozu katkı grupların, KYB taze beton özelliklerini iyileştirdiği ve en iyi sonuçların ise %7.5 ve %10 oranında kullanılması ile elde edildiği belirlenmiştir.
- Atık çinko cüruf tozu kullanılarak elde edilen KYB gruplarında, 28 gün standart kür sonunda minimum 62 MPa basınç dayanımı elde edilmiş olup, her iki kür süresinde de en iyi sonuçların ÇC10 grubunda olduğu tespit edilmiştir.
- Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, atık çinko cüruf tozu katkı KYB'lerin basınç dayanım sonuçları, kontrol grubunun dayanım sonuçlarına yaklaşık eşdeğer olduğu belirlenmiştir.
- Çimento yerine atık çinko cüruf tozunun kullanılmasıyla hem KYB maliyetleri azaltılabilecek hem de bir atık malzeme doğadan uzaklaştırılabilecek ve böylece daha çevreci bir beton üretimi gerçekleştirilebilecektir.

Sonraki çalışmalarda;

- Atık çinko cüruf tozu kullanılarak üretilen KYB'lerin çeşitli durabilite özelliklerinin incelenmesi,
- Bu atık malzemenin diğer özel beton türlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması,
- Basınç dayanımı sonuçlarının daha uzun kür sürelerinde incelenmesi,
- Atık çinko cüruf tozu içeren KYB'lerin ayrışma dirençlerinin belirlenmesinde reometre deneyi gibi daha ileri testlerin kullanılması,
- Atık çinko cüruf tozunun inceliği artırılarak, daha önceki sonuçlar ile karşılaştırılması önerilmektedir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Çalışma etik standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı vermiştir.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarların herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Veriler talep edildiği takdirde sunulabilir.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Okamura, and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *J Adv Concrete Tech*, vol. 1, no. 1, pp. 5-15, 2003.
- [2] N. Su, K. C. Hsu, and H. W. Chai, "A simple mix design method for self-compacting concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 12, pp. 1799-1807, 2001.
- [3] İ. B. Topçu, T. Uygunoğlu, ve O. Ünal, , "Kendiliğinden yerleşen betonda mineral katkıların taze beton özelliklerine etkilerinin araştırılması," *Yapıda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 2007, ss. 181-193.
- [4] M. Ardahanlı, and M. Oltulu, "Investigation of pozzolanic activity indexes of pasinler obsidian and zinc slag," *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 11, no. 2, pp. 507-521, 2021.
- [5] R. Gaimster, and N. Dixon, "Self-compacting concrete," in *Advanced Concrete Technology*, vol. 4, pp. 1-23, 2003.
- [6] V. Bonavetti, H. Donza, G. Menindez, O. Cabrera, and E. F. Irassar, "Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 6, pp. 865-871, 2003.
- [7] Y. Zhao, "Study on fracture properties of self-compacting concrete using wedge splitting test," 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, 2005, pp. 421-428.
- [8] R. A. Sağlam, N. Parlak, A. Ü. Doğan, ve M. H. Özkul, "Kendiliğinden yerleşen betonda çimento katkı uyumu," 6.Ulusal Beton Kongresi, 2005, ss. 213-224.
- [9] A. Benli, ve M. Karatas, "Uçucu kül ve silis dumanı ikameli üçlü karışımlardan üretilen kendiliğinden yerleşen harçların durabilite ve dayanım özellikleri," *DÜMF Mühendislik Dergisi*, cilt. 10, ss. 335-345, 2019.
- [10] M. Ardahanlı, M. Oltulu, and I. Alameri, "Evaluation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing fly ash subjected to early-age temperature," Hoca Ahmet Yesevi 2. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 2019.
- [11] E. H. Yücel, "Uçucu kül yerine kullanılan atık cam tozunun kendiliğinden yerleşen betonların taze, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine etkisi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt. 33, sayı. 2, ss. 153-164, 2018.
- [12] V. Kannan, "Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin," *Const and Building Mat*, vol. 160, pp. 169-179, 2018.
- [13] A. Beycioglu, and A. H. Yılmaz, "Effect of artificial pozzolans on capilarity and compressive strength of self compacting concretes," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 2, pp. 352-361, 2014.
- [14] E. Karaüç, "Uçucu kül ve zeolit in kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri," Yüksek Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [15] M. Karataş, ve Ç. Z. Ulucan, "F sınıfı uçucu kül içeren kendiliğinden sıkışan betonda karışım süresinin işlenebilirliğe etkisi," *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 2007.
- [16] A. F. Bingöl, ve İ. Tohumcu, "Silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımları," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, cilt. 15, sayı. 43, ss. 31-44, 2013.
- [17] N. Bouzoubaâ, and M. Lachemi, "Self-compacting concrete incorporating high volumes of class f fly ash: preliminary results," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 413-420, 2001.
- [18] H. Mohamed, "Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 79-86, 2011.

- [19] B. Naik, A. N. Chaubey, S. M. Mustakim, S. Paul, A. Baura, and S. Jeet, "Synthesis and characterization of ladle furnace slag on the mechanical properties of self-compacting concrete," *Materials today Proceedings*, vol. 74, pp. 673-680, 2023.
- [20] Y. Li, J. Li, C. Li, A. Chen, T. Bai, S. Tang, S. Wu, Y. Gao, H. Zhu, and J. Feng, "Strength formation mechanism and performance of steel slag self-compacting epoxy resin concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 359, pp. 1-16, 2022.
- [21] B. K. Chaitanya, and I. Sivakumar, "Influence of waste copper slag on flexural strength properties of self compacting concrete," *Materials today Proceedings*, vol. 42, pp. 671-676, 2021.
- [22] N. Gupta, and R. Siddique, "Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete incorporating copper slag," *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp. 894-908, 2019.
- [23] *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Kurumu*, 2019.
- [24] S. Mosavinezhad, and S. Nabavi, "Effect of 30% Ground granulated blast furnace, lead and zinc slags as sand replacements on the strength of concrete," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 16, pp. 989-993, 2012.
- [25] M. Alweli, "Application of granulated lead-zinc slag in concrete as an opportunity to save natural resources," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 83, pp. 54-60, 2013.
- [26] M. Alweli, "Investigation of gamma radiation shielding and compressive strength properties of concrete containing scale and granulated lead-zinc slag wastes," *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 157-162, 2017.
- [27] Z. Öztürk, M. Bağiran, B. Sağlar, L. Arslan, ve Ş. Aycan, "Agrega olarak çinko madeni cürufu kullanımının beton basınç dayanımına etkisi," *International Journal of Engineering Research and Development*, cilt. 10 sayı. 2, ss. 144-152, 2018.
- [28] İ. Aslan, M. Oltulu, and C. Karakurt, "Investigation of the waste zinc slag on the workability and mechanical properties of cement based mortars," 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, 2019.
- [29] M. Ardahanlı, M. Oltulu, and I. Alameri, "Uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri üzerine ön ısıtmanın etkisi," *Black Sea Journal of Engineering and Science*, vol. 4, no. 3, pp. 81-88, 2021.
- [30] Anonim, "TS EN 12350-8-Beton-Taze beton deneyleri - Bölüm 8: Kendiliğinden yerleşerek sıkışan beton - Çökme yayılma deneyi," 2019.
- [31] Anonim, "TS EN 12350-9-Beton-Taze beton deneyleri - Bölüm 9: Kendiliğinden yerleşen beton - V hunisi deneyi," 2011.
- [32] Anonim, "TS EN 12350-10-Beton-Taze beton deneyleri - Bölüm 10: Kendiliğinden yerleşen beton - L kutusu deneyi," 2011.
- [33] Anonim, "TS EN 12390-3-Beton-Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini," 2019.
- [34] EFNARC, "The european guidelines for self-compacting concrete," 2005.
- [35] I. Alameri, M. Oltulu, and M. Ardahanlı, "Influence of preheating on the mechanical properties of high strength concrete with micro silica filler," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 2, pp. 1084-1093, 2020.



WETTABILITY IMPROVEMENT OF PMMA FILMS WITH HIGH FREQUENCY RF PLASMAS

¹Zahide TOSUN , ²Ayhan ÖZMEN 

Selcuk University, Science Faculty, Physics Department, Konya, TÜRKİYE

¹zahidetsn@selcuk.edu.tr, ²aozmen@selcuk.edu.tr

Highlights

- Nitrogen (N) and argon (Ar) plasmas can be used to obtain hydrophilic PMMA surface.
- To reach the lowest contact angle value of PMMA surface, high plasma power is needed.
- High frequency (40.68 MHz) CCP RF plasmas can be used effectively to enhance the wettability of polymer surfaces.



WETTABILITY IMPROVEMENT OF PMMA FILMS WITH HIGH FREQUENCY RF PLASMAS

¹Zahide TOSUN , ²Ayhan ÖZMEN 

Selcuk University, Science Faculty, Physics Department, Konya, TÜRKİYE

¹zahidetsn@selcuk.edu.tr, ²aozmen@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 23.11.2022 Kabul/Accepted in Revised Form: 12.04.2023)

ABSTRACT: Poly(methyl methacrylate) (PMMA) has a wide variety of applications due to its attractive physical and optical properties. Due to its hydrophobic (water-repellent) character, the surface of PMMA should be modified before being used in applications. In this study, the surface of PMMA films were modified by 40.68 MHz high frequency CCP (capacitive-coupled plasma) RF system with nitrogen (N) and argon (Ar) gases. The experiments carried out under various plasma powers while the pressure and treatment time were kept constant. The wettability of the plasma treated surfaces was analyzed with contact angle and surface free energy (SFE) measurements. Also, the change in the chemical structure of the surfaces was investigated with X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results showed that all plasma treatments enhanced the hydrophilicity of the surfaces and the lowest contact angle values obtained at high plasma power. The total SFE of the treated surfaces increased with power and the main contribution to total SFE came from polar components. The polar groups formation on the surface after plasma treatment was proved with XPS results. Hence, it was found that high frequency CCP RF plasmas can be used effectively to obtain hydrophilic polymer surfaces.

Keywords: *Surface Engineering, Plasma Surface Modification, PMMA, Wettability, Polymer*

1. INTRODUCTION

PMMA is a low cost material and it has exceptional features such as thermal stability, chemical inertness and flexibility. It is widely used in applications in membranes [1], photonics [2], coatings and biomedical [3]. In addition, it is an alternative to glass materials due to its high light transmittance [4,5]. The main problem of PMMA is its hydrophobic surface which leads to pore adhesiveness. Therefore, it is necessary to modify the surface of the polymer to obtain hydrophilic surfaces before being used in some applications especially in biomedical fields where the metal films, proteins and cells adhering to the polymer surface [6,7]. There are various surface modification techniques for polymers such as wet chemical modification [8] and plasma treatment [9]. The most advantageous method in tailoring the surface is plasma treatment, since the bulk properties of the material remain unchanged and only the surface of the material is modified. Moreover, plasma modification is time efficient and solventless method. In addition, this process is carried out without generating chemical waste. Plasma, partially ionized gas, consists of electrons, ions and reactive neutral particles with high energy levels. These energetic particles interact with the material surface and give their energy to the material through the collisions. As a result, some bonds on the surface are broken and radicals are formed leading to cross-linking [10,11] and formation of functional groups on the surface with the interaction of particles with plasma and environment [12-14]. Plasma parameters such as plasma power, gas, pressure etc. affects the treatment process.

Nitrogen containing plasmas are used to improve surface wettability [15], electrical conductivity [16] and biocompatibility [17]. Nitrogen gas plasma contains molecules located at many different electronic levels. Therefore, it is a rich source of excited molecules. Argon plasma, on the other hand, is used for many purposes such as removing surface contamination [18] and cross-linking [19]. Although argon is a noble gas, its plasma causes the formation of polar groups on polymer surfaces [20]. Oxygen (O) and nitrogen containing groups on the surface are responsible of hydrophilicity.

*Corresponding Author: Zahide TOSUN, zahidetsn@selcuk.edu.tr

PMMA surface treatments before used in applications has been investigated for a long time [21] and still the effect of different plasma systems on modification of PMMA films has been studied [22, 23]. In the literature, for capacitively coupled RF plasmas, the system which has 13.56 MHz driven frequency were used generally for processing polymer surfaces [24-26]. In this study, PMMA surfaces were exposed to plasma generated at high frequency (40.68 MHz) CCP RF system at constant pressure with different plasma powers. Both the wettability of films and the effect of high-frequency plasmas on the processing of polymer material surfaces were investigated. It was found that high frequency CCP RF plasmas can be used effectively for surface modifications of PMMA.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Preparation of PMMA Films

PMMA powder, the chemical structure of which is given in Figure 1, (Molecular weight 120.000 Da) was dissolved in chloroform (20%, w/w) at room temperature (25 °C) and a homogeneous mixture was obtained by mixing the solution with a magnetic stirrer for two hours. Then it was poured onto microscope glasses in order to obtain PMMA films. The films were kept at room temperature for 7 days and dried by allowing the solvent to evaporate.

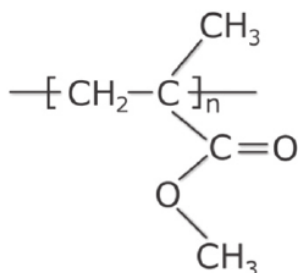


Figure 1. Chemical structure of the monomer unit of PMMA

2.2. Plasma Surface Treatment

The surface of PMMA films were treated with CCP RF plasma system. It consists of a cylindrical reactor with two aluminum electrodes placed parallel to each other, a 40.68 MHz RF power supply, a matching network and vacuum pumps (Figure 2.). The diameters of the electrodes used in the system are 200 mm. The distance between these two identical electrodes is 30 mm. Plasma processes were carried out under vacuum conditions in order to protect the surfaces from the effects of air molecules. The rotary pump reduces the internal pressure to 10^{-2} torr, while the turbo molecular pump reduces this value to 10^{-3} torr. The matching network is placed between the reactor chamber and the RF power supply in order to provide maximum power transfer to the reactor chamber by minimizing the power reflected from the reactor through the circuit elements. After the PMMA films were placed in the system, the system was put into vacuum and then gas was supplied to the system. Argon and nitrogen gases as plasma were used in the experiments. Since pressure increased due to plasma during the experiment, the system pressure was kept at constant value by means of valves. Longer exposure times did not cause any significant effect on the contact angle values in our high frequency RF system. So, only the plasma power effect on the wettability of polymer films was investigated. All of the experiments were performed at different plasma powers (25 W, 100 W and 150 W), at a constant pressure of 0.7 torr and treatment time of 5 minutes. After the surface treatment process, the system was filled with the working gas to stabilize the polymer surfaces and prevent it from direct contact with air. Then, the system was removed from the vacuum and the surfaces of the materials were analyzed.

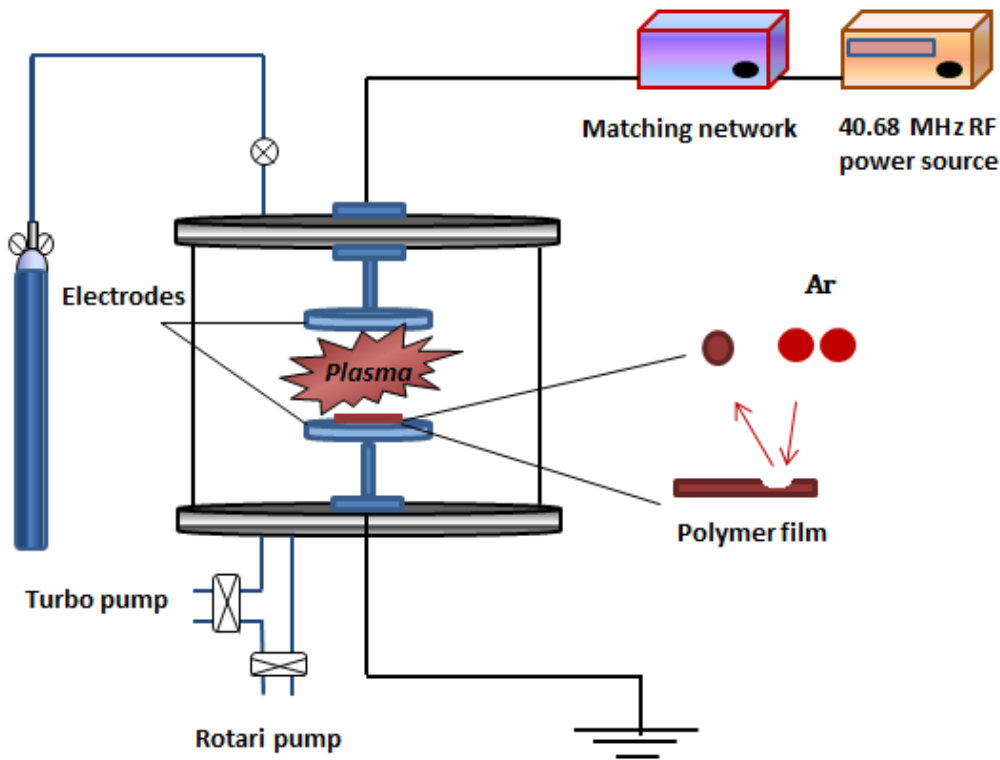


Figure 2. Experimental set up of plasma treatment

2.3. Contact Angle and SFE Measurements

Wettability is a measurement of liquids ability to spread over the surface of a particular solid. The contact angle of the surface is a measure of the wettability, and defined as the angle at which the liquid gas interface meets the solid surface. When water contact angle decreases, the wettability of the surface increases, or vice versa. Moreover, chemical groups on the surface of solid material affect wettability. One of the measurement methods that gives information about these groups is the SFE. SFE is the work that is necessary to increase the surface area of a solid and it has an influence on the wettability of solids by liquids. The relation between contact angle and SFE is given with Young's equation and defined as

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos(\theta) \quad (1)$$

where γ_l is the SFE of the liquid, γ_s is the SFE of the solid material, γ_{sl} is the solid-liquid interface free energy, and θ is the contact angle. There are some methods in the literature to find γ_s using contact angles of different liquids [27]. Among them, geometric and harmonic mean approaches are widely used to calculate the SFE of polymers [27,28]. SFE has dispersive and polar components that can be calculated from the geometric mean and harmonic mean approaches. In order to find the SFE of the solid surface, at least two contact angle measurements are required. So, not less than two liquid selections is necessary.

One of the test liquids must be selected from the polar liquids, and the other liquid must have dispersive effect. Water, diodomethane and formamide can be used for SFE measurements [28]. In this study, the surface contact angles of the treated and untreated PMMA films were made with Attension Theta goniometer. The static contact angles of the film surfaces were measured by dropping 5 μ l drop of distilled water, diiodomethane (DIM, Sigma-Aldrich) and formamide (FA, Sigma-Aldrich) onto the surface at 25 °C room temperature. All plasma treatment experiments were carried out three times and contact angle values were taken for all the surfaces with five different points in order to obtain more

accurate results. SFE values of PMMA films were obtained by using the contact angle values of liquids with both geometric and harmonic mean approaches.

2.4. XPS Measurement

XPS is a high precision surface analysis technique. When the material exposes to X-rays, the electrons are emitted from the surface and the kinetic energies of the electrons are analysed by a detector. These energies are related to the bonding energies of the atom and by measuring them the information of elemental composition and bonds on the surface can be obtained.

In this study, XPS measurements were carried out with the PHI 5000 VersaProbe 55 brand XPS device with aluminium monochromatic X-ray source, at a 45° take off angle both on the treated and untreated surfaces of PMMA films. For detailed peak analysis XPS peak program was used.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. Contact Angle Results

In order to investigate the plasma effect on the surface, contact angle measurements of different liquids (water, diodomethane and formamide) were carried out. The contact angle values of the surfaces treated with argon and nitrogen plasmas under different plasma conditions are given in **Table 1** and the graphics of contact angle values of PMMA versus plasma power for nitrogen and argon plasmas are given in Figure 3.. The water contact angle for the untreated PMMA film surface is 71.3°. As can be seen from this table, a serious decrease in water contact angle was observed even at 25 W plasma power on the surface treated with both nitrogen and argon plasmas. The water contact angle values decreased as the plasma power increased and the most hydrophilic surfaces were obtained for the films treated with argon and nitrogen plasmas at 150 W plasma power. While the contact angle change of formamide showed similar behavior with water contact angle for nitrogen plasma, surface treatments did not cause great changes in contact angles of diodomethane. The similar behavior of formamide and water on the treated surfaces is due to polar structure of formamide and water. Diodomethane is a non-polar liquid. So, small changes in the contact angles of diodomethane may be due to the increase of polar groups on the surface and the decrease of dispersive groups such as C-C and C-H. Dorrnian *et al.* [29] found that diodomethane contact angle slightly change with plasma treatment time while water contact angle decreasing due to increase of polar groups on the surface.

Table 1. Water (θ_w), diodomethane (θ_d), formamide (θ_f) contact angle values on PMMA film surfaces treated with nitrogen and argon gas plasma at different plasma powers

Sample	Power	Contact Angle		
		θ_w (°)	θ_d (°)	θ_f (°)
Untreated	0 W	71.3	32.4	54.8
Treated in nitrogen plasma	25 W	46.7	32.1	15.5
	100 W	40.6	32	12
	150 W	17.2	31.1	7.5
Treated in argon plasma	25 W	42	34	16.1
	100 W	32.9	31.7	12
	150 W	20.9	13.9	8

For argon plasma, water and formamide contact angle decreased with power increase similar to the results of nitrogen plasma treatments. However, as different from nitrogen plasma process, there is a

sharp decrease in diodomethane contact angle when the power reached 150 W. The decrease of contact angle value of all liquids may stem from the change in surface roughness for argon plasma at high plasma power. It is the aim of our further study to investigate the surface morphology in detail.

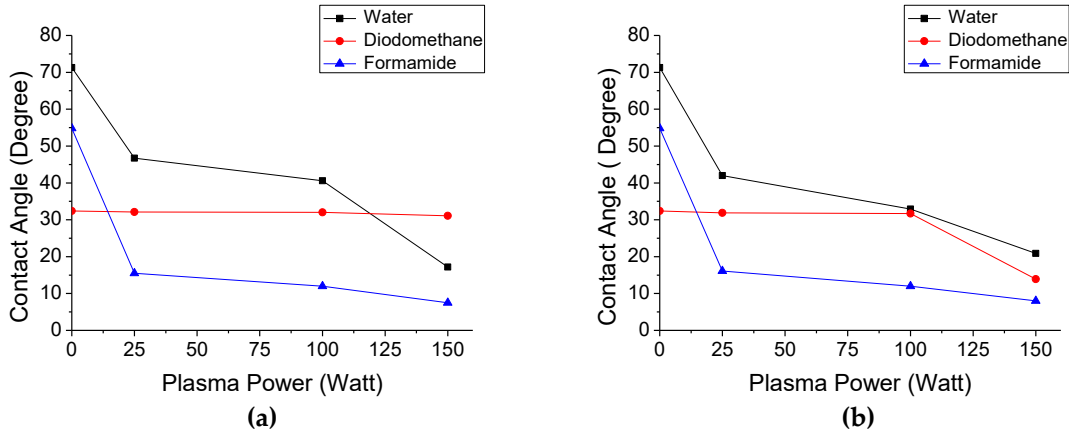


Figure 3. Contact angle values of PMMA films treated using (a) nitrogen, (b) argon plasma with respect to plasma power

3.2. SFE Results

SFE and its components give important information about which chemical effects dominate in making the surface hydrophilic. The measured contact angles of water and different liquids are used to calculate the total SFE and its components. The results obtained for different plasma conditions is given in Table 2, and the graphics of SFE of PMMA versus plasma power for nitrogen and argon plasma are given in Figure 4. Surface energy consists of two different components: polar and dispersive. Both of them contribute to total surface energy. While the polar component is responsible for the polar groups on the surface, dispersive one shows the hydrophobic character of the surface or crosslinked structure. $\gamma_{geo}, \gamma_{geo}^p, \gamma_{geo}^d$ show the total SFE calculated by geometric mean approach, its polar and dispersive components respectively. In addition, $\gamma_{har}, \gamma_{har}^p, \gamma_{har}^d$ show the total SFE calculated by the harmonic mean approach, its polar and dispersive components, respectively. Total SFE of untreated PMMA film obtained with geometric mean approach is 42.7 mJ/m^2 and harmonic mean approach is 45.8 mJ/m^2 . These values increased to 68.8 and 73.1 mJ/m^2 for nitrogen plasma treatment at 150 W plasma power.

Table 2. Total SFE and its polar and dispersive components of nitrogen and argon plasma treated PMMA films calculated with harmonic and geometric mean approaches

Sample	Power	Total SFE (mJ/m^2)		Polar Component (mJ/m^2)		Dispersive Component (mJ/m^2)	
		γ_{geo}	γ_{har}	γ_{geo}^p	γ_{har}^p	γ_{geo}^d	γ_{har}^d
Untreated	0 W	42.7	45.8	6.5	10.2	36.2	35.6
Nitrogen plasma	25 W	59.6	63.1	17.8	23	41.8	40.1
	100 W	61.8	65.6	20.7	25.9	41.1	39.7
	150 W	68.8	73.1	29.4	34.9	39.4	38.2
Argon plasma	25 W	60.6	64.2	20.4	25.4	40.2	38.8
	100 W	64.4	68.2	24	29.2	40.4	39
	150 W	69.4	73.9	25.3	32	44.1	41.9

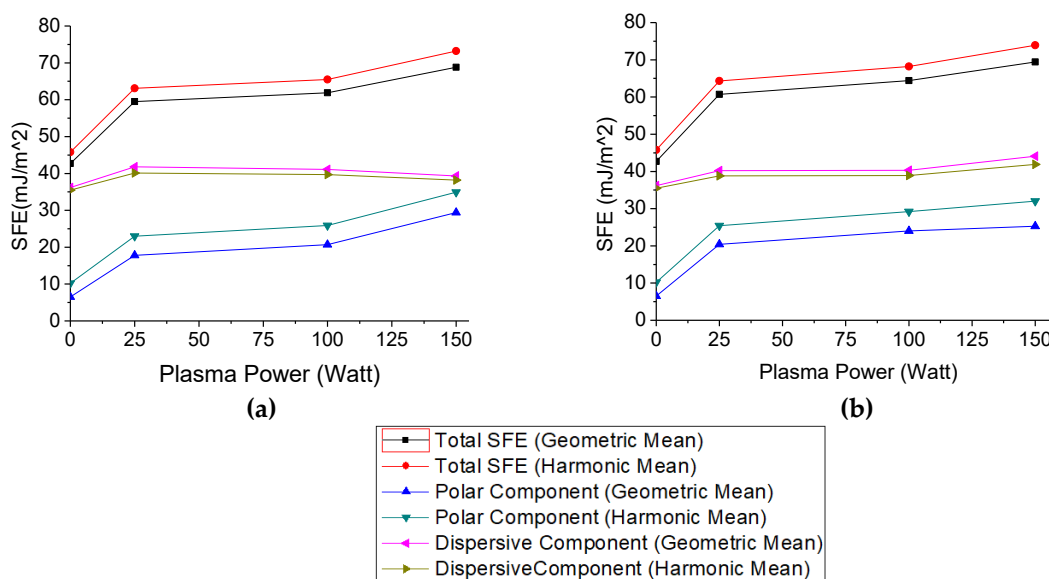


Figure 4. SFE of PMMA films treated using (a) nitrogen, (b) argon plasma with respect to plasma power

The calculations made with the geometric mean approach show that while the increase of polar component is 22.9 mJ/m^2 , that of dispersive component is 3.2 mJ/m^2 . For harmonic mean these values are 24.7 mJ/m^2 and 2.6 mJ/m^2 , respectively. It is clear that the contribution to the total SFE is mostly due to the polar component regardless of the approach. Since the polar component stems from the orientation of permanent electric dipoles, involving charge transfer interactions, dipole-dipole interactions, dipole-induced dipole interactions, hydrogen bonds, etc., it is expected to see a decrease of contact angle value accompanying an increase of SFE with its polar component due to hydrogen bonding ability of the surface. The dispersive component is related to the internal electron motions, and it is independent of the dipole moments. So, when the polar group is introduced to a polymer surface, it has no much effect on dispersive part. This is the reason of slight change in dispersive components of SFE. When it comes to argon plasma treatments, the total SFE of all modified surfaces is higher than the value of untreated samples for both geometric and harmonic mean approaches. Just as the plasma power increased, the polar groups increased on the surface and the polar component gave the most contribution to the total SFE for both approaches. As it compared with nitrogen plasma, the increase in dispersive component with plasma power for argon plasma is slightly higher than obtained for nitrogen due to the crosslinked network which was supported with XPS results.

3.3. XPS Results

To investigate the change of chemical bonds on PMMA surfaces, untreated films and the films treated at 150 W plasma power, which form the the most hydrophilic surfaces, were analyzed by XPS. C1s XPS spectra of untreated, nitrogen and argon plasma treated (at 150 W) PMMA films are given in Figure 5. Since the bonds related to C atom in the untreated PMMA structure are C-C, C-H, C-O and O-C=O, C1s envelope is curve fitted into three components at binding energies of 285 eV (C-C/C-H), 286.7 eV (C-O) and 289 eV (O-C=O) [30]. The fitted curves of untreated, nitrogen and argon plasma treated (at 150 W) PMMA films are plotted in Figure 6.

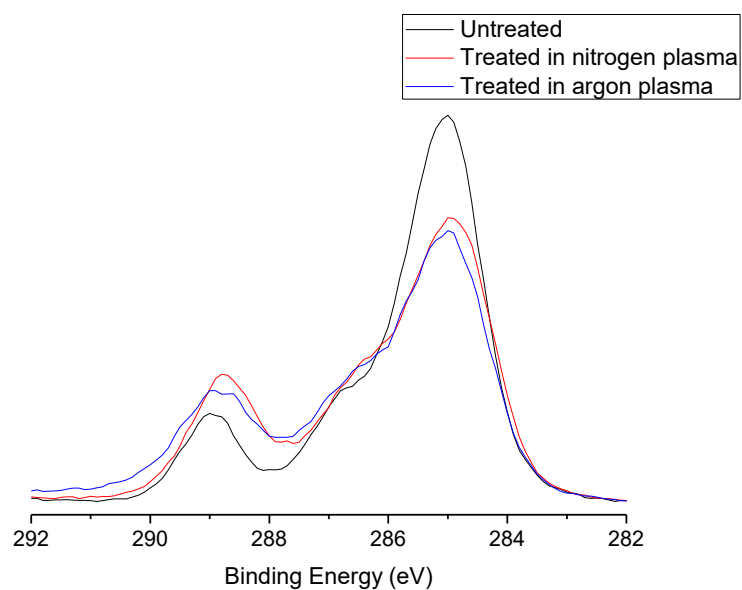


Figure 5. C1s XPS spectra of untreated, nitrogen and argon plasma treated PMMA films

Table 3. Concentration of chemical groups in the untreated and treated PMMA film surfaces with nitrogen and argon plasma at 150 W plasma power

Sample	C-C/C-H relative peak area (%)	C-O relative peak area (%)	O-C=O relative peak area (%)
Untreated	60	27	13
Treated in nitrogen plasma	51	26	23
Treated in argon plasma	54	24	22

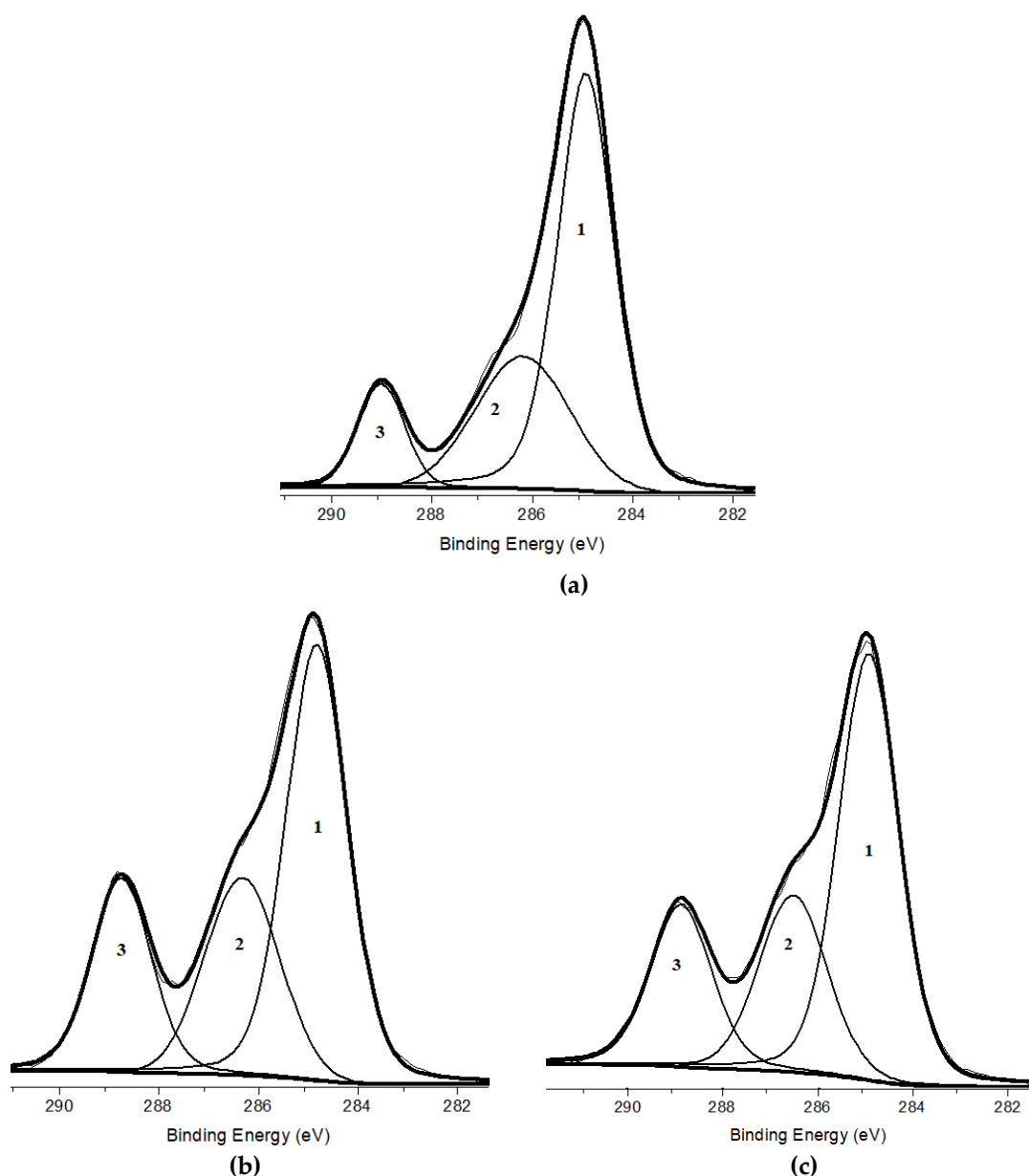


Figure 6. Deconvoluted C1s XPS spectra of (a) untreated, (b) nitrogen and (c) argon plasma treated PMMA films (at 150 W). Peak 1 (C-C/C-H), peak 2 (C-O), peak 3 (O-C=O).

For treated samples, as will be mentioned in N1s spectrum analysis, there are nitrogen containing functional groups such as C-N, C=N. But they overlapped with carbon-oxygen bond peaks and their concentration was very low (proved with the noise like structure of N1s) [31]. So it is difficult to distinguish them. In this study, it was focused on the change of main peaks in PMMA structure. In Figure 6 the C1s spectra of the untreated surfaces were compared with the C1s spectra of the plasma-treated surfaces. As can be seen in Figure 5. C-C/C-H peaks decreased and O-C=O peaks increased in C1s spectra for nitrogen and argon plasma treatments. With the aim of proving these results and for detailed analysis, the peaks were fitted and the areas of the peaks representing the bonds were calculated (Table 3).

The peak percentages of the bonds are 60% for C-C/C-H, 27% for C-O and 13% for O-C=O for untreated films. These data were in good agreement with the literature [32]. Gilliam *et al.* [32] found 57% for C-C/C-H, 29% for C-O and 14% for O-C=O for untreated PMMA surfaces. The C-C/C-H ratio for untreated PMMA decreased on treated surfaces whereas a significant increase in O-C=O bonds has been

observed. The particles with sufficient energy in the plasma broke C-C/C-H bonds in the polymer structure and caused the formation of polar groups which was demonstrated with SFE analysis. It is expected to see an increase for all oxygen containing bonds due to polar groups. However, C-O bond slightly decreased after treatments. This can be explained by disruption of the C-O bonds and formation of functional groups containing nitrogen, which has similar binding energies with O=C-O [33]. C-C/C-H bond percentage is slightly higher in argon plasma treatments than that of nitrogen plasma. This proves the formation of crosslinked network on the PMMA surface and increase in the dispersive component of SFE.

For nitrogen plasma, active nitrogen groups in plasma can break the bonds in the polymer chain, causing the formation of nitrogen containing polar groups (such as imine, amide and nitroso). In the literature, it was found that nitrogen containing groups generally have peaks around 400 eV for nitrogen plasma treated polymer surface [34]. To investigate the presence of nitrogen containing groups on the surface, N1s XPS spectra were examined for both untreated surfaces and plasma-treated surfaces (Figure 7). The C bond ratio in the PMMA structure is considerably higher than the nitrogen ratio on the treated surfaces. So, when the nitrogen peaks are magnified, noise-like peaks are observed, unlike the C1s spectrum. Since the PMMA polymer does not contain nitrogen in its structure, its ratio on the untreated surfaces in the N1s XPS spectrum is quite low.

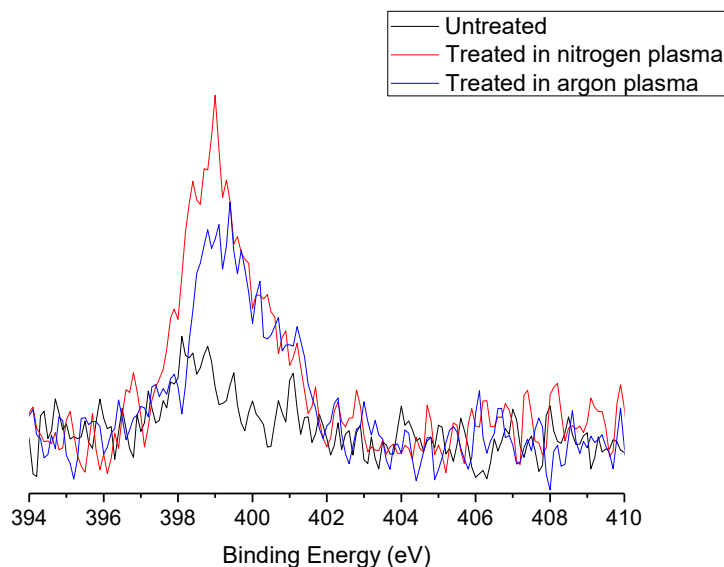


Figure 7. N1s XPS spectrum of PMMA films untreated, treated in nitrogen and argon plasma

On the plasma treated surfaces, peaks of nitrogen were observed between 398 eV and 402 eV. Therefore, nitrogen dependent groups were formed on the treated surfaces. An example reaction diagram of how these groups can be formed is given in Figure 8. Moreover, since the surfaces of the samples become active after treatment, the oxygen and nitrogen in the atmosphere after the treatment can be adsorbed on the surface and cause the formation of oxygen containing groups. The increase in O=C=O bonds for treated surfaces is caused by the atmospheric environment. Also, nitrogen peak was observed after argon plasma treatments (Figure 7). The nitrogen containing groups formation on polymer surface can be explained with the interaction of the surface with atmosphere after treatment. As a result, the formation of both O=C=O and nitrogen containing groups on the surface lead to an increase in the polar part of the SFE for all treatments.

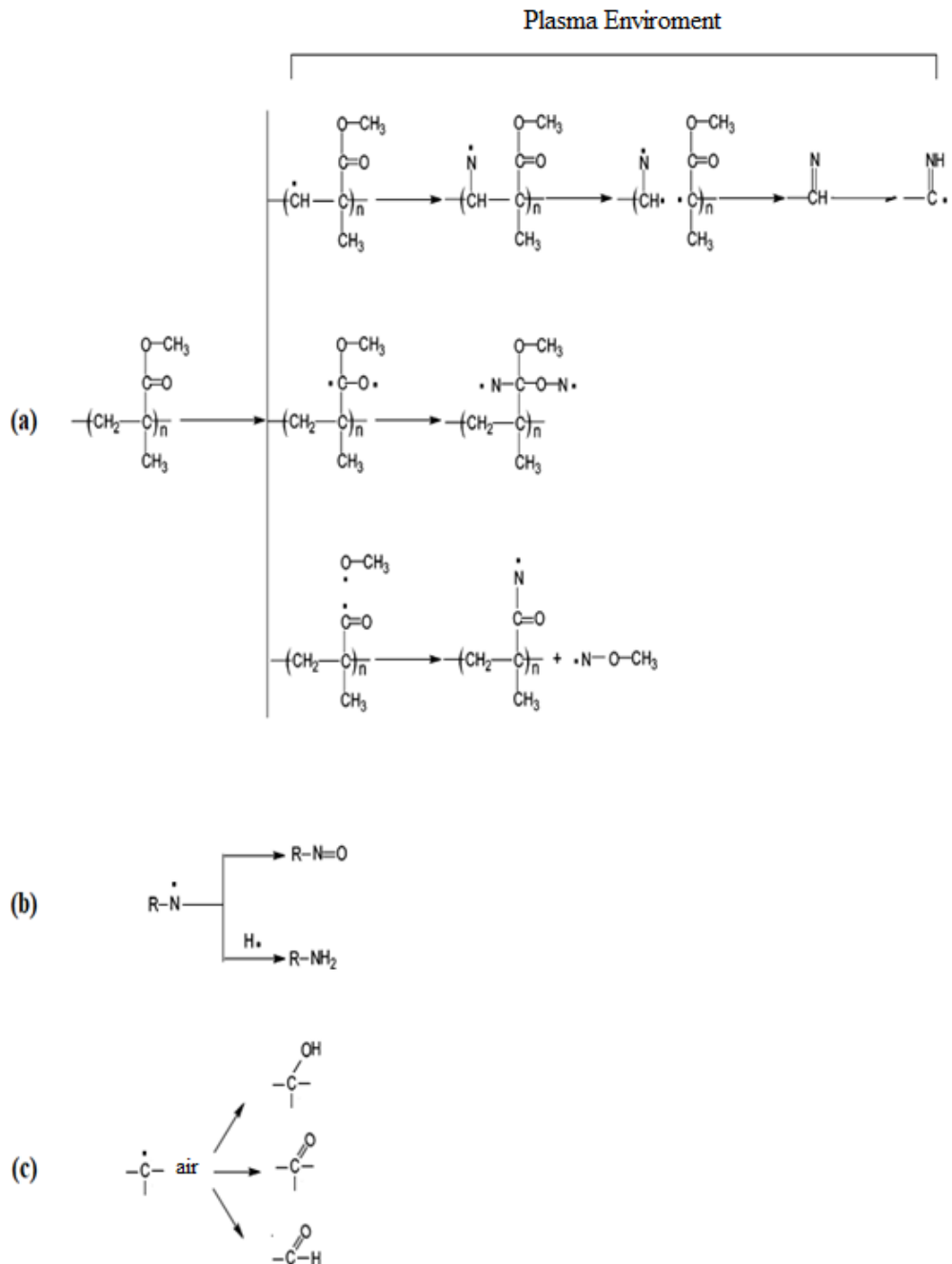


Figure 8. Some possible reactions that may occur on the surface as a result of the interaction of PMMA plasma with nitrogen gas plasma and air. (a) The process of activation of PMMA surfaces after plasma treatment, (b) the formation of stable nitrogen compounds with plasma [34], (c) The interaction of active surfaces with air.

4. CONCLUSION

This study clearly shows that high driving frequency CCP RF plasmas have important effect on PMMA surface modification. In all experiments the water contact angle of the surfaces decreased which proves the hydrophilic properties of the films. The lowest contact angle values obtained at high plasma power. When the SFE were examined, the highest total SFE values were found with both geometric and harmonic mean approaches at high plasma power and the most contribution comes from polar component due to the oxygen and nitrogen containing polar groups which was proved with XPS results.

These results show that high frequency (40.68 MHz) CCP RF plasmas can be also used to obtain hydrophilic PMMA films. The interactions of plasma particles (i.e radicals, ions and electrons) affect the surface wettability. Changing the plasma parameters such as plasma power changes the plasma environment and plasma-surface interactions. In order to analyse which processes in the plasma environment affect the surface chemistry, it is necessary to diagnose the plasma with the techniques such as optical emission spectroscopy and Langmuir probe [35, 36].

Declaration of Ethical Standards

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

Credit Authorship Contribution Statement

Zahide TOSUN: Investigation, Analysis, Writing-Review & Editing

Ayhan ÖZMEN: Analysis, Writing-Review & Editing

Declaration of Competing Interest

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

Funding / Acknowledgements

This study is part of PhD thesis prepared by Zahide Tosun and is supported by Selcuk University BAP office with the research project number 12101011. The authors are thankful to Prof. Dr. Sinan Bilikmen and Prof. Dr. D. Akbar for their support in experimental studies.

Data Availability

Research data has not been made available in a repository.

REFERENCES

- [1] M.S.A. Hussien, M.I. Mohammed, and I. S. Yahia, "Flexible photocatalytic membrane based on CdS/PMMA polymeric nanocomposite films: multifunctional materials," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 2, pp. 45225–45237, 2020.
- [2] P.M.T. García, R.P. Merino, J.D. Cruz, J.E. Espinosa, R. Aceves, E.M. Barbosa, and O.P., Moreno, "Luminescent properties of Eu³⁺-doped hybrid SiO₂-PMMA material for photonic applications," *Micromachines*, vol. 9(441), pp. 1-10, 2018.
- [3] A. Trentin, A.L. Gasparini, F.A. Faria, S.V. Harb, F.C. Santos, S.H. Pulcinelli, C.V. Santilli, and P. Hammer, "Barrier properties of high performance PMMA-silica anticorrosion coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 138 (105398), pp. 1-13, 2020.
- [4] T. Yamamoto, T. Yamada, A. Miyake, H. Makino, and N. Yamamoto, "A review of the properties and applications of poly(methyl methacrylate) (PMMA)," *Polym. Rev.*, vol. 55, pp. 678-705, 2015.
- [5] H. Lin, D.E. Day, and J.O. Stoffer, "Optical and mechanical properties of optically transparent poly(methyl methacrylate) composites," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 32, pp. 344-350, 1992.
- [6] S. Patel, R.G. Thakar, J. Wong, S.D. McLeod, and S. Li, "Control of cell adhesion on poly(methyl methacrylate)," *Biomaterials*, vol. 27, pp. 2890-2897, 2006.

- [7] A.K. Riau, D. Mondal, G.H.F. Yam, M. Setiawan, B. Liedberg, S.S. Venkatraman, and J.S. Mehta, "Surface modification of PMMA to improve adhesion to corneal substitutes in a synthetic core-skin keratoprosthesis," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 7, pp. 21690-21702, 2015.
- [8] M. Herrero, R. Navarro, Y. Grohens, H. Reinecke, and C. Mijangosa, "Controlled wet-chemical modification and bacterial adhesion on PVC-surfaces," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, pp. 1915-1918, 2006.
- [9] S.K. Nemani, R.K. Annavarapu, R. Mohammadian, A. Raiyan, J. Heil, M.A., Haque, A. Abdelaal, and H. Sojoudi, "Surface modification of polymers: methods and applications," *Advanced Materials Interface*, vol. 5(1801247), pp. 1-26, 2018.
- [10] S. Tajima, and K. Komvopoulos, "Effect of reactive species on surface crosslinking of plasma-treated polymers investigated by surface force microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89(124102), pp. 1-3. 2006.
- [11] C. Borcia, G. Borcia, and N. Dumitrascu, "Relating plasma surface modification to polymer characteristics," *Applied Physics A*, vol. 90, pp. 507-515, 2008.
- [12] J.P. Booth, M. Mozetic, A. Nikiforov, and C. Oehr, "Foundations of plasma surface functionalization of polymers for industrial and biological applications," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 31 (103001), pp. 1-28. 2022.
- [13] A. Vesel, and M. Mozetic, "New developments in surface functionalization of polymers using controlled plasma treatments," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50(293001), pp. 1-37, 2017.
- [14] S. Guruvenket, G.M. Rao, M. Komath, and A.M. Raichur, "Plasma surface modification of polystyrene and polyethylene," *Applied Surface Science*, vol. 236, pp. 278-284, 2004.
- [15] C. Canal, R. Molina, E. Bertran, and P. Erra, "Wettability, ageing and recovery process of plasma-treated polyamide 6," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 18, pp. 1077-1089, 2012.
- [16] C. Su, F. Lin, J. Jiang, H. Shao, and N. Chen, "Mechanical and electrical properties of graphene-coated polyimide yarns improved by nitrogen plasma pre-treatment," *Textile Research Journal*, vol. 91, pp. 1-14, 2021.
- [17] A. Davoodi, H.H. Zadeh, M.D. Joupari, M.A. Sahebalzamani, M.R. Khani, and S. Shahabi, "Physicochemical- and biocompatibility of oxygen and nitrogen plasma treatment using a PLA scaffold," *AIP Advances*, vol. 10 (125205), pp.1-8, 2020.
- [18] L. Mosera, R. Steinera, F. Leipold, R. Reichle, L. Marota, and E. Meyera, "Plasma cleaning of ITER first mirrors in magnetic field," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 463, pp. 940-943, 2015.
- [19] H. Liu, Y. Pei, D. Xie, X. Deng, Y.X. Leng, Y. Jin, and N. Huang, "Surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) by argon plasma," *Applied Surface Science*, vol. 256, pp. 3941-3945, 2010.
- [20] G. Tan, R. Chen, C. Ning, L. Zhang, X. Ruan, and J. Liao, "Effects of argon plasma treatment on surface characteristic of photopolymerization PEGDA-HEMA hydrogels," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 124, pp. 459-465, 2011.
- [21] P. Gröning, M. Collaud, G. Dietler, and L. Schlapbach, "Plasma modification of polymethylmethacrylate and polyethyleneterephthalate surfaces," *Journal of Applied Physics* vol. 76, pp. 887-892, 1994.
- [22] M. R. Yari, M. S. Zakerhamidi, and H. Ghomi, "Glow discharge plasma stabilization of azo dye on PMMA polymer," *Scientific Reports*, vol. 12 (18358), pp. 1-13, 2022.
- [23] A. Sikora, D. Czynkowski, B. Hrycak, M. M. Dusanowska, M. Łapiński, M. Dors, and M. Jasiński, "Surface modification of PMMA polymer and its composites with -PC61BM fullerene derivative using an atmospheric pressure microwave argon plasma sheet," *Scientific Reports*, vol. 11(9270), pp. 1-17, 2021.
- [24] M. Jafari, and D. Dorrani, "Surface modification of PMMA polymer in the interaction with oxygen-argon RF plasma," *Journal of Theoretical and Applied Physics*, vol. 5, pp. 59-66, 2011.

- [25] N. Puač, Z.L. Petrović, M. Radetić, and A. Djordjević, "Low pressure RF capacitively coupled plasma reactor for modification of seeds," *Materials Science Forum*, vol. 494, pp. 291-296, 2005.
- [26] S. Kitova, M. Minchev, and G. Danev, "Soft plasma treatment of polymer surfaces," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 7, pp. 249-252, 2005.
- [27] M. Żenkiewicz, "Methods for the calculation of surface free energy of solids," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 24, pp. 137-145, 2007.
- [28] R. N. Shimizu, and N. R. Demarquette, "Evaluation of surface energy of solid polymers using different models," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 76, pp. 1831-1845, 2000.
- [29] D. Dorranean, Z. Abedini, A. Hojabri, and M. Ghoranneviss, "Structural and optical characterization of PMMA surface treated in low power nitrogen and oxygen RF plasmas," *Journal of Non-Oxide Glasses*, vol.1, pp. 217-229, 2009.
- [30] S. Mukhopadhyay, S.S. Roy, R.A. D'Sa, A. Mathur, R.J. Holmes, and J.A. McLaughlin, "Nanoscale surface modifications to control capillary flow characteristics in PMMA microfluidic devices," *Nanoscale Research Letters*, vol. 6(411), pp. 1-12, 2011.
- [31] A. Vesel and M., Mozetic, "Modification of PET surface by nitrogen plasma treatment," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 100, 2008.
- [32] M. Gilliam, S. Farhat, A. Zand, B. Stubbs, M. Magyar, and G. Garner, "Atmospheric plasma surface modification of PMMA and PP micro-particles," *Plasma Processes and Polymers*, vol.11, pp. 1037-1043, 2014.
- [33] L.J. Gerenser, J.M. Grace, G. Apai, and P. M. Thompson, "Surface chemistry of nitrogen plasma-treated poly(ethylene-2,6-naphthalate): XPS, HREELS and static SIMS analysis", *Surf. Interface Anal.*, vol. 29, pp. 12-22, 2000.
- [34] S. Tang, and H. S. Choi, "Comparison of low-and atmospheric-pressure radio frequency plasma treatments on the surface modification of poly(methyl methacrylate) plates," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol.112, pp. 4712-4718, 2008.
- [35] E. Vassallo, A. Cremona, F. Ghezzi, and D. Ricci, "Characterization by optical emission spectroscopy of an oxygen plasma used for improving PET wettability," *Vacuum*, vol. 84, pp. 902-906, 2010.
- [36] M. Mavadat, M. Ghasamzadeh-Barvaz, S. Turgeon, C. Duchesne, and G. Laroche, "Correlation between the plasma characteristics and the surface chemistry of plasma-treated polymers through partial least-squares analysis," *Langmuir*, vol. 29, pp. 15859-15867, 2013.



SÜPER KRİTİK CO₂'nin P3HT/PCBM ve PVP-Ag_{NP} MALZEMELERDE NANOPARTİKÜL DAĞILIMININ KONTROLÜ

¹Fatma Zehra YALÇIN , ²Selda TOPÇU ŞENDOĞDULAR , ³Levent ŞENDOĞDULAR 

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE
¹fzy02@hotmail.com, ²selda.topcu@erciyes.edu.tr, ³sendogdular@erciyes.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- P3HT-PCBM ve PVP-Ag nanotoz (PVP-Ag_{NP}) ince filmlerinin süper kritik CO₂ tavlama sürecindeki davranışları,
- Süper kritik CO₂ ile tavlama yönteminin partikül konsantrasyon dağılımı kontrolünde geleneksel ısıtma işlemiyle nazaran daha esnek (dinamik) bir yöntem olduğu,
- Polimer/hava arayüzeyi kontrol edilebilmesi ile, antibakteriyel yüzey, organik fotovoltaik güneş hücreleri uygulamalarında kullanılabilir adaylardır.



SÜPER KRİTİK CO₂'nin P3HT/PCBM ve PVP-Ag_{NP} MALZEMELERDE NANOPARTİKÜL DAĞILIMININ KONTROLÜ

¹Fatma Zehra YALÇIN , ²Selda TOPÇU ŞENDOĞDULAR , ³Levent ŞENDOĞDULAR 

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE
¹fzy02@hotmail.com, ²selda.topcu@erciyes.edu.tr, ³sendogdular@erciyes.edu.tr

(Geliş/Received: 26.12.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.04.2023)

ÖZ: Günümüzde, polimerik nanokompozit malzemeler kompozit malzemeler içinde öncelikli olarak tercih edilen malzeme grubunda ilk sırada bulunmaktadır. Nano boyutta takviye taneciklerinin yer aldığı kompozit malzemelerin niteliklerinin bulunması, geliştirilmesi ve üretilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada, P3HT-PCBM ve PVP-Ag nanotoz (PVP-Ag_{NP}) ince filmleri döndürmeli kaplama yöntemi ile hazırlandıktan sonra süper kritik CO₂ tavlama yapılmıştır. Üretilen filmlerin daha sonra optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve atomik kuvvet mikroskop ile analizleri yapılmıştır. Bu araştırmaların sonucunda, P3HT-PCBM ve PVP-Ag_{NP} numunelerinde, CO₂ tavlama değişkenleri üzerinden partiküllerin yüzeysel faz ayrışması ile yüzey göçü kontrolünün kapsamlı bir şekilde yapılabildiği gözlenmiştir. Polimer içinde yer alan CO₂ miktarına bağlı olarak partikül konsantrasyon dağılımının değişiklik gösterdiği saptanmıştır. Böylelikle polimer nanokompozitlerin özelliklerinin anlaşılabilir olarak kullanım alanlarının genişletilmesi, düşük maliyete sahip yeni malzemelerin üretilmesi ve CO₂ kritik ıslatma mekanizmasının farklı sistemler ile en iyi şekilde kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: P3HT-PCBM, PVP-Ag, Süperkritik Karbondioksit, İnce Film Kaplama

Control of Nanoparticle Distribution of Super Critical CO₂ in P3HT/PCBM and PVP-Ag_{NP} Materials

ABSTRACT: Today, polymeric nanocomposite materials are in the first place in the group of primarily preferred materials among composite materials. It is very important to find, develop, and produce the properties of composite materials with nano-sized reinforcement particles. In this study, supercritical CO₂ annealing was performed after P3HT-PCBM and PVP-Ag nanopowder (PVP-Ag_{NP}) thin films were prepared by spin coating method. The produced films were then analyzed with optical microscope, scanning electron microscope, and atomic force microscope. As a result of these investigations, it has been observed that surface migration control can be made comprehensively by superficial phase separation of particles over CO₂ annealing variables in P3HT-PCBM and PVP-Ag_{NP} samples. It has been determined that the particle concentration distribution varies depending on the amount of CO₂ in the polymer. Thus, by understanding the properties of polymer nanocomposites, it has been understood that expanding the usage areas, producing new materials with low cost and the CO₂ critical wetting mechanism can be used in the best way with different systems.

Keywords: P3HT-PCBM, PVP-Ag, Supercritical Carbon Dioxide, Thin Film Coating

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz teknolojisinde istenilen malzeme ve özellik ilişkisine göre metal-metal alaşımları yerini farklı yapılarıdaki kompozit malzemelere bırakmıştır. Akademik ve endüstriyel önemi giderek artan kompozit malzemelerden yüksek özelliğe sahip farklı türden takviye elemanları ile matrisleri içeren malzemelerin geliştirilmesi ise büyük önem arz etmektedir. Kompozit malzemeler incelendiğinde

polimerik nanokompozit malzemelerin günümüzde öncelikli olarak ve yoğunlukla tercih edildiği görülmektedir. Nano boyuttaki takviye taneciklerini ihtiva eden kompozit malzemelerin özelliklerinin bulunması, bu özelliklerin geliştirilmesi ve dolayısı ile uygulama alanlarının genişletilerek malzemelerin üretilmesi günümüzde oldukça önemli bir çalışma alanını içine almaktadır. Farklı alanlarda (örneğin; sensör teknolojisi, otomotiv sektörü, tıp) malzemelerin ara yüzey ile yüzey özelliklerinin kontrol edilebilmesi adına nanopartikül ilavesinin yapıldığı görülmektedir. Malzemelerin nihai özellikleri nanopartiküllerin şeklinden, boyutundan ve türünden bağımsız olarak matris içerisindeki dağılımına bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir. Tek katmanlı polimer matris içerisindeki nanopartiküllerin istenildiği gibi kontrolünün sağlandığı bir sistem henüz tam olarak geliştirilememiştir.

Maddenin basıncı hangi değerde olursa maddenin sıvı halde bulunabileceği mümkün olan en yüksek sıcaklık değeri o maddenin kritik sıcaklığı (T_c) olarak adlandırılır. Kritik basınç (P_c) ise kritik sıcaklıktaki maddenin buhar basıncı olarak tanımlanır. Madde, kritik nokta üzerindeki sıcaklıkta ve basınçta iken maddenin hallerinden farklı olarak yeni bir bölge ortaya çıkar. Bu bölgedeki akışkan, 'süper kritik akışkan' olarak adlandırılmaktadır. Kritik noktada tüm maddeler karakteristik bir özellik sergilemektedir. Süper kritik akışkanların yoğunlukları, viskoziteleri ve diğer özellikleri, maddenin sıvı ve gaz fazındaki özellikleri arasında yer almaktadır. Süper kritik akışkanların pek çok avantajının bulunmasının yanı sıra çözücü etkisi de bulunmaktadır. Çözünürlüğü düşük olan bileşiklerin süper kritik bölgede çözünürlüğü artırılabilirken, bazı bileşikler bu bölgede çok iyi çözünebilmektedir [1].

Süper kritik bölgede tek faz bulunmakla birlikte bu bölgede yer alan akışkanlar hem sıvı hem gaz olmak üzere iki özelliği de birden göstermektedir. Akışkan olarak bilinen süperkritik akışkanların akış özelliği gazlara benzerken, yoğunluk bakımından özelliği sıvılara benzemektedir. Süperkritik akışkanlar düşük viskoziteye, yüzey gerilimine ve kütle transferine olanak sağlayan yüksek yayınlılık katsayısına sahiptir.

Süperkritik akışkanların çözme gücü yoğunluğa bağlıdır. Bu yoğunluk, basınç ve sıcaklığın değiştirilmesi ile ayarlanabilir. Basınç arttıkça, süperkritik akışkanın yoğunluğu da artar. Süperkritik akışkanların çözme gücünün kontrolünün sağlanması, sıvı çözücülere nazaran daha basittir [2].

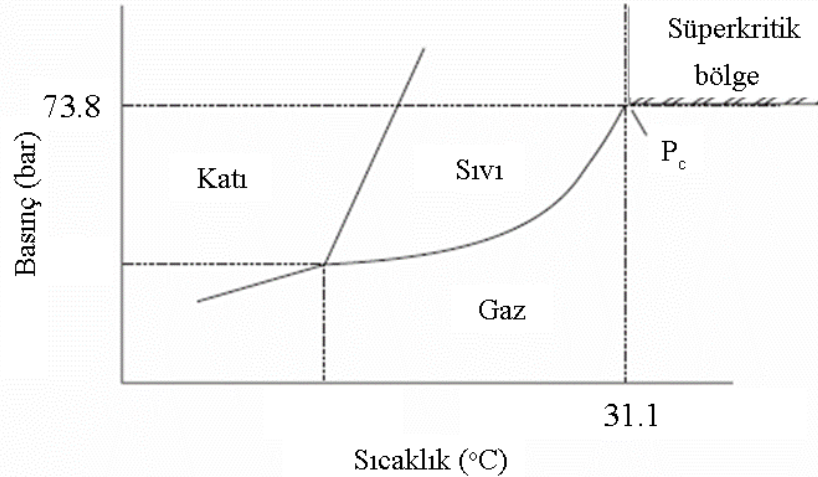
Süper kritik akışkan süreçlerinde su, alkol, amonyak, amin vb. gibi pek çok çeşit akışkan kullanılmaktadır. Bu akışkan çeşitleri arasında ise en yaygın kullanılan karbondioksittir (CO_2). Zehirli değildir ve tutuşma özelliği bulunmamaktadır. Üründen uzaklaştırılması ise basittir [3][2]. CO_2 'in kritik sıcaklığı ve kritik basıncı sırasıyla $31.1^\circ C$ ve 73.8 bar'dır (Şekil 1). Bu kritik koşullarda işletme süresi düşerken verim de artmaktadır [4] [5].

Hem bilimsel hem de teknolojik açıdan bir polimer bileşenindeki nanopartikül dağılımının kontrolü büyük önem arz etmektedir. Bir yandan daha geniş arayüzey alanları ile inorganik nanopartiküllerin homojen dağılımının tribolojik, manyetik, mekanik ve optoelektronik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılabilirken diğer yandan nanopartiküllerin bir polimer/substrat ara yüzeyine termal tavlama ile tercihi segregasyonu polimer ince filmlerin kopmasını (dewetting) önlemek için kullanılabilir. Nanopartiküllerin dağılım (montaj) işlemleri tek bir polimer bileşeninde bile sentetik yüzey modifikasyonlarının gereksinimleri ve hem entalpik hem de entropik katkılarla ilişkili hassas bir denge nedeniyle karmaşıktır. Burada, polimerlerde gömülü şekilde bulunan nanopartiküllerin uzamsal dağılımlarının kontrolünün sağlanabilmesi amacıyla süper kritik karbondioksit ($scCO_2$) kullanılmıştır (T_c : $31,3^\circ C$ ve P_c : $7,38$ MPa). Süperkritik karbondioksit, çoğu polimerler için etkin bir plastikleştirici özelliğe sahiptir ve parçacık yüzeyinde kritik nokta yakınında bir ıslatma tabakası oluşturarak polimer matrise ve gömülü bulunan nanopartiküllere bir çözücü gibi davranabilir. Koga ve grubu [6],[7],[8][9] bu entalpik katkının aksine bunun entropi odaklı ayrışma olarak adlandırıldığını ve yer değiştiren nanopartiküllerin, polimer zincirlerinin konfigürasyonlarındaki sınırlamalarda önemli olduğunu ve hatta polimerlerle uyumlu olarak, nanopartiküllerin polimer / hava yüzeyine hareketini göstermişlerdir.

$scCO_2$ 'in önemi henüz tam olarak polimerler üzerinde anlaşılammıştır. Bunun başlıca nedeni $scCO_2$ 'nin uygun parametreler altında ($T < 100^\circ C$, $P < 50$ MPa) belirli sınıfta yer alan silikon esaslı

polimerler "CO₂-seven " ile yüksek miktarda flor içeren polimerler içinde çözünebilmesidir. [10]. Bununla birlikte yapılan çalışmalar kapsamında düşük çözünürlüğe sahip yığın (bulk) polimerlerinin ince filmlerinin skCO₂ altında yüksek miktarlarda (~100nm) CO₂ molekülünü absorbe ettiği belirlenmiştir [11][12]. Bu absorpsiyonun polimer-CO₂ etkileşiminden bağımsız olarak evrensel bir olay olduğu anlaşılmıştır. Koga ve grubu CO₂'in bu alışıl gelmişin dışındaki absorpsiyonunun geleneksel çözücülerin aksine kritik akışkanın yoğunluğundaki dalgalanmalardan kaynaklı olduğunu göstermiştir. [6]. Polimerin yüzey özellikleri üzerindeki kontrolün sağlanabilmesi açısından bu uygulama yeni ve etkili bir polimer-arayüzey süreç yönetimi olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda yarı kristal haldeki polimerlerin moleküler yapılarının düzenlenmesinde skCO₂ etkili bir plastikleştirici olarak da uygulanabilmektedir [13][14].

Yapılan araştırmalar, skCO₂'in yoğunluk dalgalanmalarının aynı zamanda farklı polimer matrislerde, farklı boyutlardaki nanopartiküllerde ve nanopartikül ligantlarının farklı türlerinde polimer/CO₂ ara yüzeyinde nanopartiküllerin yüzey migrasyonunu uyardığını göstermiştir [12]. Viskoz bir polimer matrisinde yer alan sıvıların sınırlı penetrasyon gücü sebebiyle bir polimer matrisinde sıvı moleküllerin konsantrasyon gradyanı oluşturulur. Kritik sınıra yakın olan CO₂ moleküllerinin kritik ısınmasına maruz kalan nanoparçacıklar, yüzeyin yakınındaki CO₂ konsantrasyonunun dik bir konsantrasyon gradyantından yararlanarak CO₂ açısından zengin faza geçerler.



Şekil 1. CO₂ için sıcaklık-basınç faz diyagramı [4].

Figure 1. Temperature-pressure phase diagram for CO₂ [4].

Akışkan bir polimer matrisindeki sıvıların sınırlı penetrasyon kuvveti sebebi ile bir polimer matrisinde, akışkan moleküllerin konsantrasyon gradyanı oluşturulur. Asada ve grubu [12], sınır durumundaki yoğunluk dalgalanması ve sonrasında uygulanan hızlı kurutma işlemi sonrasında dondurulmuş PS/PCBM nanokompozit ince filmler üzerinde çalışma yapmış ve CO₂ sonrası nanopartiküllerin yüzeye doğru oluşan taşınımını doğrulamışlardır. Bu nedenle, bu çalışma, ilgili taşınımın kontrollü bir şekilde yapı-özellik ilişkisine hizmet edecek bir sistem şeklinde oluşturulması için farklı polimer nanokompozit sistemleri üzerinden optimize edilmesini kapsamaktadır.

Bu çalışmada geleneksel ısıl işleme faz ayrışımı kuvvetli bir şekilde gerçekleşmiş olduğundan ve bu yüzeyde heterojen bir yapı gözlenmesinden ötürü, basınç, sıcaklık, zaman ve etkileşim parametresi gibi daha fazla parametre üzerinden daha esnek yapı kontrolü sağlayan özgün bir çalışma yapılmıştır.

*Corresponding Author: Selda TOPÇU ŞENDOĞDULAR, selda.topcu@erciyes.edu.tr

P3HT-PCBM ve PVP-Ag nanokompozit malzeme kullanılarak skCO_2 ile partiküllerin yüzeye göçü ve yüzeysel faz ayrışmasına olan etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Polivinilpirolidon (PVP, Sigma Aldrich, $M_w \sim 40.000$), Poly (3-hekziltiyofen-2,5-diyil) (P3HT ($M_n \sim 54.000-75.000$, regioregular, American Dye Source Inc) ve Poly 6, 6-fenil C 61-bütrik asit metil ester (PCBM, Nano-C, ortalama tane boyutu 2 nm) malzemeleri ince film oluşturmak için kullanılmıştır. Saf su içerisinde çözünebilir olması sebebi ile PVP polimerleri tercih edilmiştir. Bunun tercih edilmesinin nedeni ise, nanopartikül katkıya sahip polimer ince filmi sentezlemek için 3 nm boyutuna sahip gümüş nano toz dispersiyonu (Nanografi, %99.9, 2200 ppm) saf su içinde gelmesinden ötürüdür. Farklı oranlarda karıştırılan farklı çözücülerin nanopartikül katkılı polimer ince filmlerinde makro faz ayrışmalarına sebep olduğu bilinmektedir. Buna ilaveten çözücü olarak saf suyun kullanıldığı polimer/gümüş partikül sistemine alternatif olarak matris/katkı uyumunun yüksek olduğu P3HT/PCBM sistemi belirlenmiştir. Bu sistemde PCBM karbon esaslı (C60) bir nanopartikül katkı bileşenidir. Çözücü olarak tolüen P3HT/PCBM yapısında kullanılmıştır.

1cm x1cm boyutundaki Si destekler altlık olarak kullanılmıştır. Bahsi geçen altlıklar 100mm çapında ve <100> yöneliminde olacak şekilde University Wafer firmasından temin edilmiştir. Buna ilaveten Si (silisyum) altlık yüzeyini temizlemek amacıyla kullanılan azot gazı ve yüksek saflıkta (>%99) bulunan CO_2 gazı Kayseri'de yer alan Gazsan isimli firmadan temin edilmiştir.

2.2. Yöntem (Method)

2.2.1. Altlıkların temizlenmesi (Cleaning the substrates)

Piranha çözeltisi, 1:1:1 oranında % 98 lik Sülfürik Asit (H_2SO_4 , 98.05 g/mol), saf su ve Hidrojen Peroksit (H_2O_2) çözeltisi hazırlandı. Piranha çözeltisi içine daldırılan Si altlıklar 60°C 'de 1 saat çözeltide bekletildi. Daha sonra piranha çözeltisinden kalabilecek olan safsızlıkların uzaklaştırılması için önce saf suya daldırılıp daha sonrasında azot gazı ile Si altlık yüzeyine temizleme işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonrası hidrofilik bir yüzey oluşturmak adına saf etanol içerisinde konulan Si altlıkların ultrasonik cihazında birkaç dakika bekletilmiştir. Ardından, 15 dakika süre ile Si altlıkların UV-Ozon cihazında (BioForce UV-O Pro Cleaner) oksit tabakası oluşturma ve yüzey temizleme işlemine devam edilmiştir. Bu işlemde sonra altlıklar film kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.

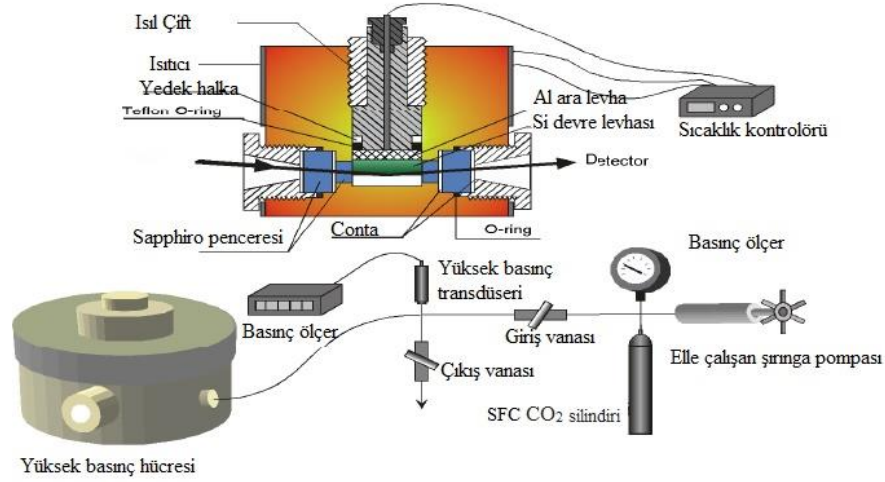
2.2.2. Çözelti Hazırlama (Solution preparation)

Çözelti hazırlama işlemi sırasında; P3HT/PCBM çözeltisi, ısıtıcı üzerinde (yaklaşık $50-60^\circ\text{C}$ 'de) tolüen içerisinde polimer ve katkının ayrı ayrı seyreltilerek çözüldüğü ve devamında PCBM/tolüen ve polimer/tolüen çözeltisinin karıştırıldığı bir yöntemle üretilmiştir. %1'lik polimer çözeltisi çözücüye bağlı olarak filmler üretilmiştir.

Diğer yandan, ağırlıkça %2'lik PVP/Etanol karışımı homojen olacak şekilde çözdürülmüştür. Diğer bir kaptaki ağırlıkça %0,5'lik gümüş katkılı nano toz etanol içerisinde eklenip homojen bir görünüm sağlanıncaya kadar karıştırıldı. Hazırlanan Ag katkılı nano toz/etanol çözeltisi ile PVP/Etanol çözeltisi ağırlıkça 1/1 oranında yaklaşık 1 saat süre karıştırıldı.

1 cm x 1 cm boyutlarında kesilen Si altlıklar yüzey temizleme işlemleri sonrasında belirlenen oranlarda hazırlanan homojen polimer/nano katkı çözeltisi ile 4000 rpm hızda 30 sn süre ile vakumlu döndürmeli kaplama cihazında (Laurell 23 NPP, 3-150 mm, 12000 rpm) döndürmeli kaplanmıştır. Kaplanmış olan altlıklar buharlaşma sıcaklığının hemen üstündeki bir sıcaklık ile (saf su için 105°C ve tolüen için 60°C) vakum fırınında 2 saat geleneksel ısı işleme maruz bırakılarak çözücülerin yüzeyden

uzaklaştırılması ve altlık/polimer arayüzeyinin güçlendirilmesi sağlanmıştır. Böylelikle çözücü/CO₂ etkileşiminden ötürü polimer ince filmin etkilenme ihtimali CO₂ ortamında ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 2. Yüksek Basınç Odasının Şematik Görüntüsü.

Figure 2. Schematic View of the High Pressure Chamber

2.2.3. CO₂ uygulaması (CO₂ process)

Şekil 2.'de gösterilen basınç hücresi ile CO₂'in sıcaklığı ve basıncı kontrol edilebilmektedir. Basınç hücresinin etrafında sarılı bulunan bakır tesisat içinden geçen radyatör sıvısı ile hücre içindeki gazın sıcaklığı ayarlanabilmektedir. Radyatör sıcaklığının ve basınç hücresi içine uzatılan bir termokupl vasıtası ile CO₂ sıcaklığının kontrolü sistem üzerinden hassas bir şekilde sağlanabilmektedir.

Hazırlanan ince filmler, skCO₂ prosesi için tasarlanmış yüksek basınç hücresine yerleştirilir. Numuneler izotermal (T=36 °C) koşulda 6, 8, 10 MPA'daki süper kritik basınçta ve etrafında yüksek ve düşük basınçlardaki CO₂'e kısa (2 saat) süre ile ve uzun (12, 24 saat) süre ile maruz bırakılır. Sonrasında sistemin basıncı, polimer matrisinin vitrifiye edilmesi ile film yapılarını katılaştırmak amacı ile, hızla atmosfer basıncına düşürülür.

2.2.4. Karakterizasyon (Characterization)

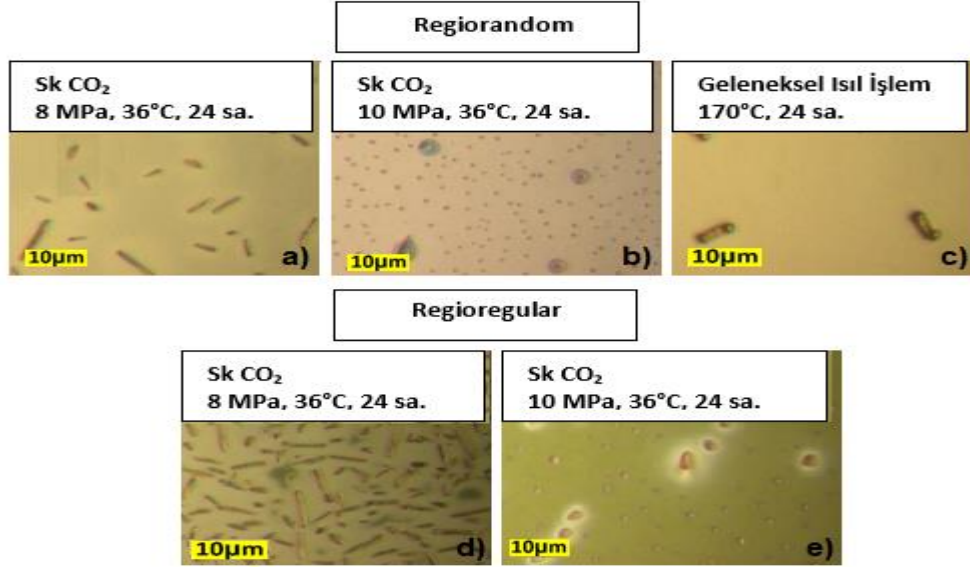
Filmlerin morfolojisi optik mikroskop (Zeiss A5 polarized), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Zeiss GEMINI 500 model FESEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (Veeco Multimode 8) analizleri edilmiştir. Film kalınlıklarında Spektroskopik Elipsometre (Gaertner LSE-USB) Testi ile film kalınlığı ölçümleri yapılmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

Si tek kristallere, organik fotovoltaik güneş hücreleri olarak, alternatif yapılardan biri de PCBM katkılı P3HT'dir. Bu yapıların ticari potansiyeli ise cihaz verimliliğine bağlıdır. İki fazlı yapının optimizasyonu ile maksimum verim elde etmek mümkündür. Bu demek oluyor ki, n ve p tipi yarı iletkenlerin faz ayrışımının kontrolü bu açıdan çok önemlidir. Taktisite açısından daha düşük kristal yapıya sahip, regiorandom (atactic) olarak adlandırılan (ağırlıkça 1:1 oranında) P3HT'ye katılanan

*Corresponding Author: Selda TOPÇU ŞENDOĞDULAR, selda.topcu@erciyes.edu.tr

PCBM'nin, CO₂ koşullarına bağlı olarak P3HT içerisindeki yüzeyel dağılımı Şekil 3 (a-c)'de görülmektedir. Kritik ve süperkritik CO₂ koşullarında yüzeydeki PCBM konsantrasyon dağılımının geleneksel ısı işlem örneğine göre daha geniş bir aralıkta kontrol edilebildiği görülmektedir. Ayrıca daha küçük aglomeraların yüzey kaplamasının homojen bir şekilde sağlanabildiği görülmektedir. Ayrıca regioregular (sindiotaktik) polimerin CO₂ ile etkileşiminin PCBM'ye göre daha zayıf olduğu ve dolayısıyla CO₂ altındaki PCBM partiküllerinin yüzeye daha fazla çekildiği görülmektedir. Bu, parçacıklı katkı maddesinin konsantrasyon dağılımını kontrol etmek için CO₂ kullanımının da polimer etkileşimine bağlı olduğu anlamına gelir.

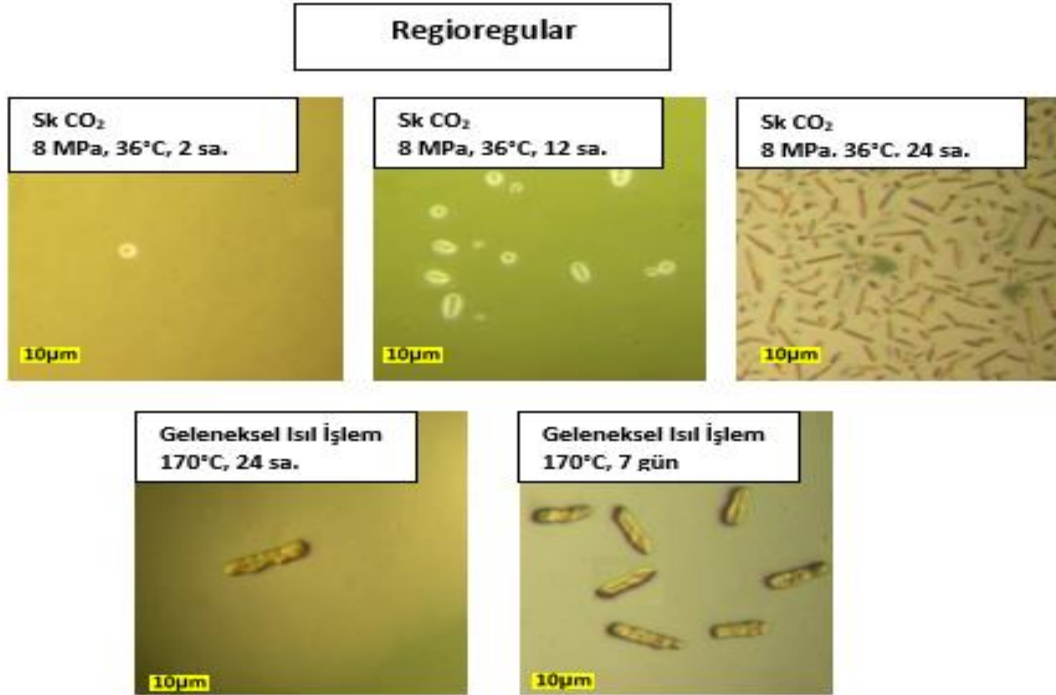


Şekil 3. PCBM katkılı Regiorandom (a-c) ve Regioregular (d-e) P3HT ince film yüzeylerinin geleneksel ısı işlem ve CO₂ ile tavlama sonrasındaki optik mikroskop görüntüleri.

Figure 3. Optical microscope images of PCBM doped Regiorandom (a-c) and Regioregular P3HT thin film surfaces after CO₂ and conventional heat treatment annealing.

Önceden belirlenen ortam koşullarında tavlanan polimer nanokompozitin yüzeyinde zamana bağlı olarak oluşan faz ayrışımı Şekil 4'te incelenmiştir. Uygulama zamanının regioregular P3HT/PCBM numuneleri için faz ayrışımının bir parametresi olduğu görülmektedir. Uygulama zamanının artırılması ile birlikte nanopartiküllerin yüzeye daha fazla çekilebildiği ve partikül konsantrasyonunun yüzeyde artması ile birlikte mikro boyutlardaki bir topaklanmanın da gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Şekil 3'te ve 4'te faz ayrışımının geleneksel ısı işlem ile kuvvetli bir şekilde olduğu ve yüzeyde heterojen bir yapı görülmektedir. Bu nedenle basınç, etkileşim parametresi, sıcaklık, zaman gibi birçok parametre üzerinden daha esnek yapı kontrolü sağlayabilen skCO₂ 'in kullanımı özgün bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.

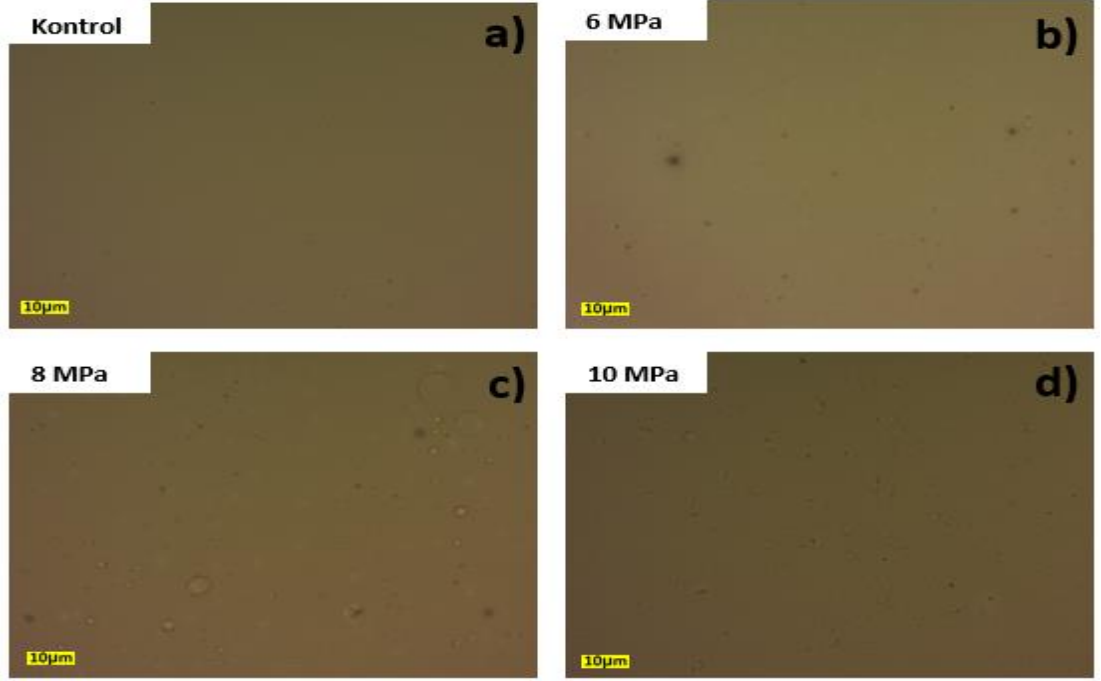
Buna ilaveten geleneksel ısı işlem ve CO₂ numunelerinin karşılaştırılması sonucunda düşük sıcaklık uygulaması yapılan CO₂ numunelerinin yüzey dağılımlarının daha homojen olduğu ve partiküllerin hava arayüzeyine olan yönelimlerinin ise daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel ısı işlem numunelerinde daha büyük topaklanmaların görülmesinin nedeninin, yüzey altında bulunan partiküllerin yüzeye çekilememesinden ve yüzeyde bulunan partiküllerin topaklanmasından ötürü kaynaklandığı düşünülmektedir. 7 gün boyunca numuneler geleneksel ısı işlem ile tavlansın bu durumun geleneksel yöntem için kararlı bir yapı olup olmadığı araştırılmıştır (Şekil 4). Araştırma sonucunda faz ayrışımının sınırlı olduğu ve yapının çok fazla değişkenlik göstermediği görülmektedir.



Şekil 4. PCBM katkılı Regioregular P3HT ince film yüzeylerinin CO₂ (a-c) ve geleneksel ısı işlem (d-e) tavlama sonrası optik mikroskop görüntüleri.

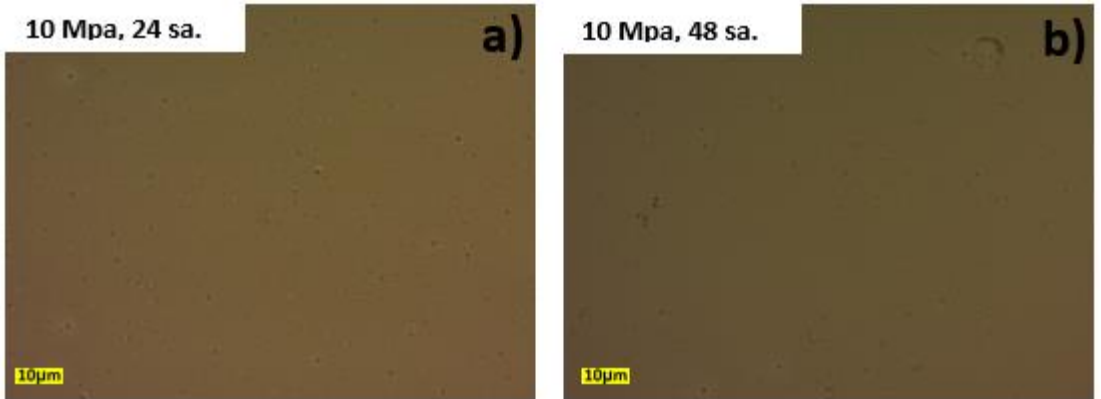
Figure 4. Optical microscope images of PCBM doped Regioregular P3HT thin film (100 nm) surfaces after CO₂ (a-c) and conventional heat treatment (d-e) annealing

Faz ayrışmasının şiddetini belirleyen dinamiklerin polimer/CO₂ ve partikül/CO₂ etkileşimlerinin olduğu yukarıdaki sonuçlarda belirtilmiştir. Bu sebeple farklı bir sistem olan PVP/Ag nanopartikül üzerinde de çalışmalar yapılarak söz konusu tavlama mekanizmasının evrenselliği incelenmiştir. Bununla bağlantılı olarak ağırlıkça 1:1 oranında elde edilen PVP/Ag sisteminin CO₂ öncesi ve CO₂ sonrası görüntüsü şekil 5'te, zamana bağlı olarak yüzeylerinin kritik üstü CO₂ tavlama sonrası optik mikroskop görüntüleri ise Şekil 6'da yer almaktadır. Buradan elde edilen sonuçlarda yüzey faz ayrışmasının CO₂ koşullarına bağlı olarak kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır. Ag nanopartiküllerin yüzeye yönelimleri ile yüzeyde mikrometre büyüklüğünde topaklar oluşturabildikleri ve bu ayrışmanın zamana bağlı olarak artabildiği görülmektedir.



Şekil 5. Farklı basınçlarda Ag nanopartikül katkılı PVP ince film (100nm.) optik mikroskop görüntüleri.

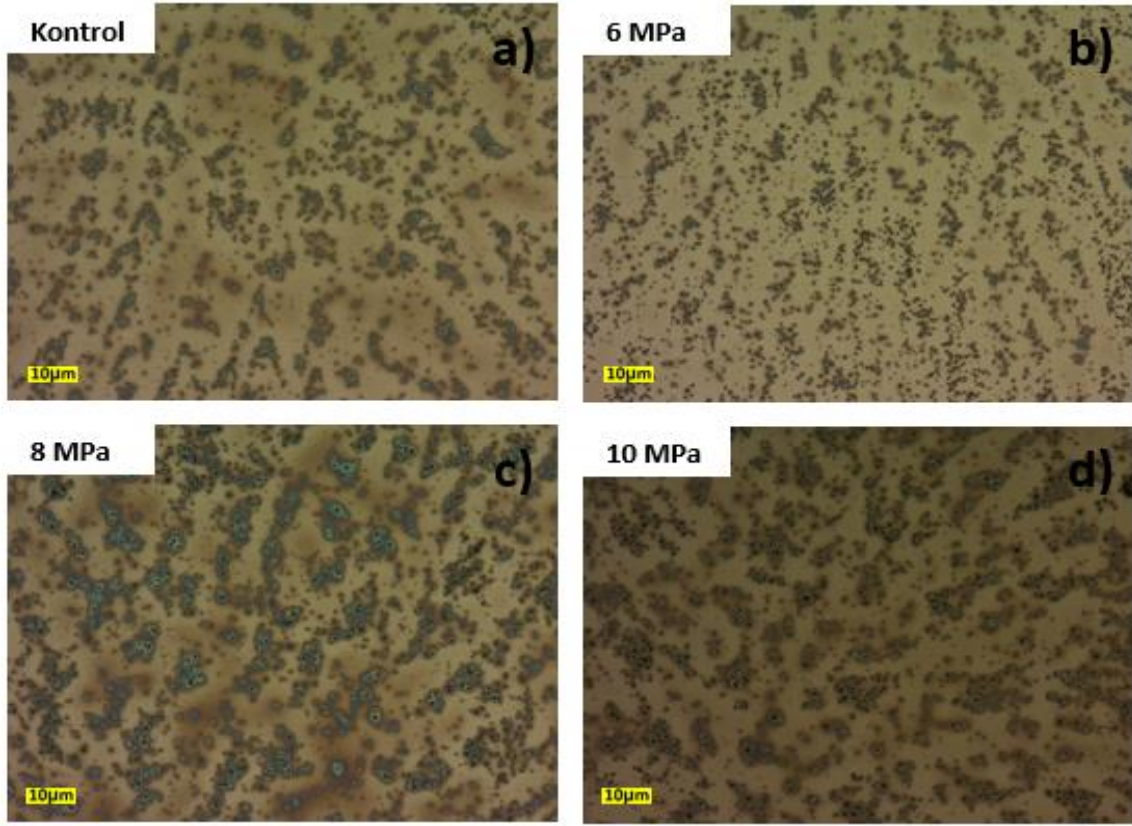
Figure 5. Optical microscope images of Ag nanoparticle doped PVP thin film (100nm.) at different pressures.



Şekil 6. Farklı zamanlarda Ag nanopartikül katkılı PVP ince filmin (100nm) kritik üstü CO₂ tavlama sonrası optik mikroskop görüntüleri.

Figure 6. Optical microscope images of Ag nanoparticle-doped PVP thin film (100nm) after supercritical CO₂ annealing at different times.

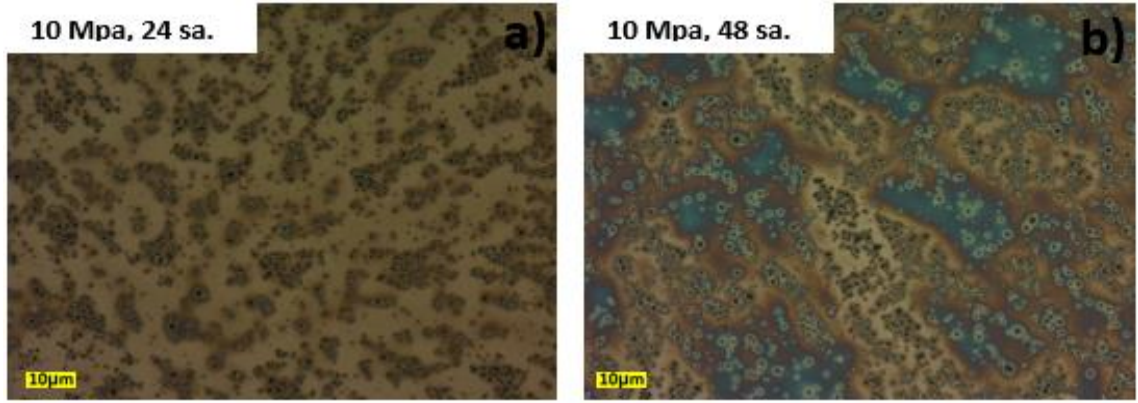
CO₂ yardımı (kritik ıslatma) ile nanopartiküllerin yüzeye çekilmesi aşamasında etken bir parametrenin de nanopartikül boyutunun olabileceği; boyutsal kısıtlamalar ve yüzey aktif alanın artırılması veya azaltılması ile ve boyutsal kısıtlamalar ile bu faz ayrışımının sınırlandırılabilmesi öngörülmüştür. Bu sebeple Şekil 5'te ve Şekil 6'da gösterilen numunelerle aynı koşullar altında hazırlanan ancak nanopartikül yerine Ag (gümüş) katkılı nanotoz eklenmesi ile elde edilen numunelere ait sonuçlar Şekil 7'da ve Şekil 8'da verilmektedir. Katkı miktarı bu numunelerde de (ağırlıkça 1:1 oranında) sabit tutulmuştur. Böylelikle boyut etkisinin ele alınabilmesi için partikül boyutu dışında kalan tüm parametreler sabit tutulmuştur.



Şekil 7. CO₂ tavlama öncesi ve sonrası Ag nanopartikül katkılı nanotoz/PVP ince film (100nm.) yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri.

Figure 7. Optical microscope images of Ag nanoparticle doped nanowire/PVP thin film (100nm.) surfaces before and after CO₂ annealing.

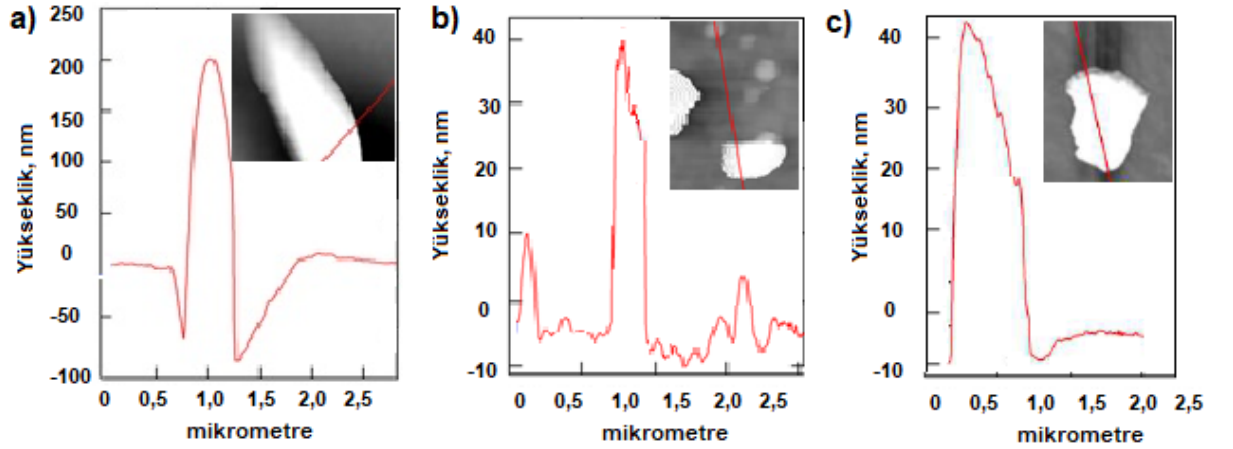
Şekil 7'deki ve Şekil 8'deki sonuçlar karşılaştırıldığında nanopartikül katkılı numunelerin aksine CO₂ tavlama öncesinde bile nanotoz numunelerinde yüzey faz ayrışımının olduğu tespit edilebilmektedir. Bunun çözünürlük (miscibility) üzerinde partikül boyutunun etki etmesinden ötürü olduğu düşünülmektedir. Çözünürlük ile partikül boyutunun ters orantılı olarak değiştiği bilinmesine rağmen yüzey faz ayrışımının yine CO₂ ile kontrol edilebildiği (nanotoz numuneleri kendi içinde değerlendirildiğinde) ve nanotozların yığın (bulk) numuneden yüzeye çekilebildiği görülmüştür. Özellikle Şekil 7(b) numunesinde 6 MPa CO₂ altında tavlanan kompozitlerin yüzeyinde kontrol numunesine göre daha az topaklanma olduğu görülmektedir. Bu da aglomere olan nanotozların CO₂ vasıtasıyla ayrıştığını ve yüzeyde daha homojen dağıldığını göstermektedir.



Şekil 8. Zamana bağlı Ag nanopartikül katkılı nanotoz/PVP ince film (100nm.) yüzeylerinin kritik üstü CO₂ tavlama sonrası optik mikroskop görüntüleri.

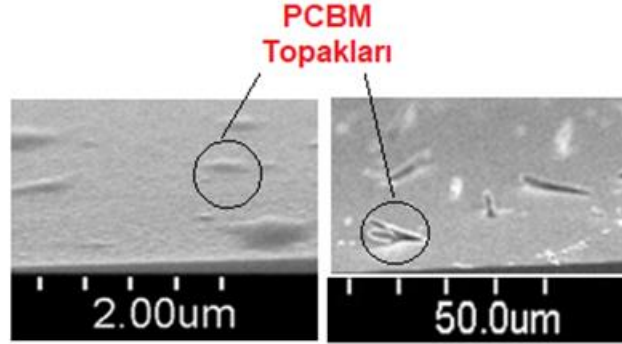
Figure 8. Optical microscope images of time-dependent Ag nanoparticle doped nanopowder/PVP thin film (100nm.) surfaces after supercritical CO₂ annealing.

Daha önce bahsedildiği üzere nanopartikül katkılı numunelere nazaran, nanotoz katkılı PVP numunelerinin faz ayrışmasının daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna ilaveten zamana bağlı olarak Şekil 8(a) ve Şekil 8(b) de nanotozların topaklandığı ve topaklanmanın artmasıyla birlikte ise heterojen bölgelerin oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 8(b)'de mavi ve sarı olarak gözlemlenen renk değişimlerinin, film kalınlıklarının değişimiyle bağlantılı bir ışık kırınımı olduğu düşünülmektedir. Yani polimer zincirlerini öteleyen büyük topaklar ince ve kalın bölgelerin oluşumuna yol açmıştır.



Şekil 9.a) Kritik koşulda (8 MPa, 36 °C) 24 saat, b) Kritik Üstü Koşulda (10 MPa, 36 °C) 24 Saat süreyle işlem gören P3HT/PCBM ve c) Ag nanopartikül katkılı nanotoz/PVP ince filmin (8MPa, 36 °C) AFM Görüntüleri.

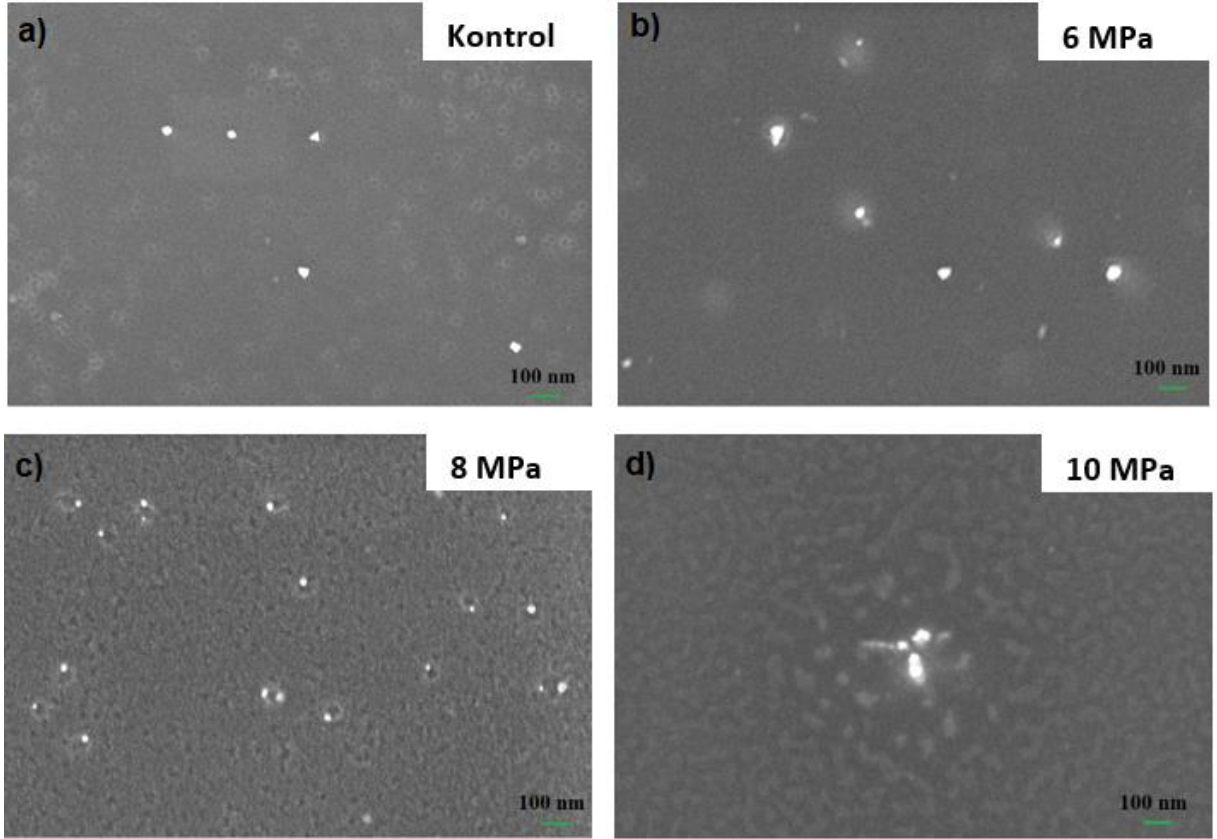
Figure 9.a) P3HT/PCBM Atomic Force Microscope Images Treated for 24 Hours at Critical Condition (8 MPa, 36 °C), b) for 24 Hours at Supercritical Condition (10 MPa, 36 °C).



Şekil 10. 50 nm P3HT / PCBM termal tavllanmış ince filmlerin 2 μ m ölçekli (solda) ve kritik koşullarda CO₂ ile tavllanmış (8Mpa) ince filmlerin (sağda) SEM görüntüleri.

Figure 10. SEM images of 50 nm P3HT / PCBM thermally annealed thin films at 2 μ m scale (left) and CO₂ annealed (8Mpa) thin films (right) at critical conditions.

Atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri Şekil 9(a) ve 9(b) de incelenen P3HT/PCBM ince filmlerinin; 24 saatlik süreyle 170 °C'de ısıtma işlemi sonrası ve süper kritik koşulda (36 °C, 8 MPa) 24 saatlik süre sonundaki görüntüleri SEM (taramalı elektron mikroskobu) ile de incelenmiştir (Şekil 10). Şekil 9(c)' de Ag nanopartikül katkılı nanotoz/PVP ince filmin (8MPa, 36 °C) AFM görüntüsü verilmiştir. Görüntülere göre; film yüzeyinde ısıtma işlemi sonrası platoya benzeyen alanların oluştuğu fakat bu yüzeyin kritik koşullar altında (36 °C, 8 MPa) CO₂ ile işlem gördükten sonra PCBM'ce zenginleştiğini gösteren topaklaşmaların mevcut olduğu görülmüştür. Kritik koşullar altında CO₂ ile şekil kontrolü, yüzey dağılımı ve boyut kontrolü daha esnek bir şekilde yapılabilmektedir.



Şekil 11. 100 nm PVP/Ag_{NP} ince filmlerin termal tavlama sonrası (a) ve kritik altı (b) , kritik (c) ve kritik üstü (d) koşullardaki SEM görüntüleri.

Figure 11. SEM images of 100 nm PVP/Ag_{NP} thin films after thermal annealing (a) and subcritical (b), critical (c), and supercritical (d) conditions.

100 nm PVP/Ag_{NP} ince filmlerin Şekil 11'de termal tavlama sonrası (a), kritik altı (b) , kritik (c) ve kritik üstü (d) koşullarındaki SEM görüntüleri görülmektedir. Çözücünün zayıf bir uçucu olması dolayısıyla diğer numunelere nazaran PVP ince filmleri hidrofilik yüzeylere kaplanmıştır. Partiküllerle olan etkileşimin hidrofilik arayüzeyde kuvvetli olduğu görülmektedir. Bu nedenle özellikle 10 MPa CO₂ basıncı ile tavllanmış filmlerde taneciklerin alt tabaka arayüzünde yoğunlaştığı ve hava arayüzüne doğru yönelimlerinin zayıf olduğu görülmektedir. Ayrıca CO₂ etkileşiminin kritik noktada substrat arayüzüne göre daha baskın olduğu görülmektedir.

4. SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, geleneksel ısı işleme alternatif olarak polimerik nanokompozitler üzerinde CO₂ tavlama, CO₂/malzeme etkileşimi ve CO₂ tavlama parametrelerinin nihai yapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Organik çözücülere nazaran daha az toksik olması ve düşük sıcaklıkta uygulanabilmesi (31-36°C) sebebiyle CO₂ tavlama çevreci bir uygulama olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel ısı işlemin faz ayrışımında sahip olmadığı esneklik, polimer nanokompozit ince filmlerin CO₂ tavlama ile sağlanabilmektedir. Hazırlanan numunelerin, optik mikroskop, SEM ve AFM ile analizleri yapılmıştır. Bu sonuçlara göre, numune ile CO₂ etkileşiminin son yapı üzerinde etkili olduğu ve bu etkileşimin CO₂ koşullarına bağlı meydana gelen yoğunluk dalgalanmaları ve malzemenin boyutu (aktif yüzey alanı) ile polimer-partikül sisteminin malzeme esaslı içeriğiyle değişkenlik gösterdiği saptanmıştır. Yoğunluk dalgalanmalarının en yoğun şekilde gerçekleştiği süper kritik bölgede partiküllerin yüzeye daha kuvvetli çekildiği anlaşılmıştır. Bunun öncelikli nedeninin, kritik ıslatma ve polimer matris içinde artan CO₂ miktarı olarak düşünülmektedir. skCO₂ altında polimer zincirlerinin maksimum uzama gösterdiği literatürde yer alan önceki çalışmalarda belirtilmiştir [6],[7]. Bu ise polimer zincirlerinin, CO₂ ile

etkileşimini ilgili koşulda artırabilmek adına, uzayarak aktif yüzey alanını (R_g) arttırmak istediği şeklinde yorumlanabilir. Buna ilaveten polimer/hava ara yüzeyine taşınan partiküllerden CO₂/polimer etkileşiminin CO₂/partikül etkileşiminden daha zayıf olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni hava ara yüzeyindeki CO₂ yoğunluğunun maksimum seviyede olması sebebiyledir. Buradan anlaşıldığı üzere CO₂'nin partikül etrafında bir (kritik ıslatma) tabaka oluşturduğu ve partiküllerin polimer içerisindeki hareket yeteneğini (mobility) yükselttiği düşünülmektedir.

Diğer bir yandan, PVP-Ag_{NP} ve P3HT-PCBM numunelerinde CO₂ tavlama parametreleri üzerinden partiküllerin yüzeyel faz ayrışmasının ve yüzey göçünün kapsamlı bir şekilde kontrol edilebildiği de gözlenmiştir. Polimer içerisindeki CO₂ miktarı ile söz konusu olan partikül konsantrasyon dağılımının değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Konsantrasyon dağılımını kontrol eden parametreler; basınç, partikül tane boyutu, etkileşim parametreleri (interaction parameters, μ) ve uygulama zamanı olarak saptanmıştır. CO₂ ile tavlama yönteminin partikül konsantrasyon dağılımı kontrolünde geleneksel ısı işlem tavlama yöntemine nazaran daha esnek (dinamik) bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Polimer kompozit sistemler için CO₂ tavlama işleminin etkilerinin farklı malzemeler üzerinde incelenmesi ile bu işlemin evrensel bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bu yöntemler polimer/hava arayüzeyi kontrol edilebilmesi ile, antibakteriyel yüzey, organik fotovoltaiik güneş hücreleri ve yüzey güçlendirilmiş rezonans (SERS) konularında patent unsuru gelişmelerin kaydedilebileceği öngörülmektedir.

Enerji uygulamalarından elektrik malzemelere ve hatta tıp alanına kadar polimer/nanopartikül kompozit sistemleri çok geniş bir alanda önemli olmaktadır. Bu sistemlerde son ürünün makro özellikleri üzerinde polimer matris içinde bulunan katkının hacimsel konsantrasyon dağılımı belirleyici olmaktadır. Yüzey uygulaması ve elektronik açısından kontrollü faz ayrışımı tercih edilebilirken, mekanik açıdan bu dağılımın homojen olması tercih sebebi olabilir. Dolayısı ile söz konusu mekanizmanın kontrollü bir şekilde uygulanması hem yeni malzemeler üretilmesine hem de var olan malzemelerin verimliliğinin artırılmasına imkân sağlayacaktır.

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)

FZY: Deneylerin yapılması FZY, STŞ: Deneylerin tasarlanması, sonuçların yorumlanması, tam metnin yazılması ve revizyonu; LŞ: Sonuçların yorumlanması, tam metnin yazılması.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarların herhangi bir çıkar çatışması yoktur

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeler Birimi (BAP) (Proje no: FBA-2018-8320) tarafından desteklenmiştir.

*Corresponding Author: Selda TOPÇU ŞENDOĞDULAR, selda.topcu@erciyes.edu.tr

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Çalışmada kullanılan tüm verilere, makalenin yazarlarından D.M. üzerinden ulaşılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Sareen, G. Mathew, and L. Joseph, "Improvement in solubility of poor water-soluble drugs by solid dispersion," *Int. J. Pharm. Investig.*, vol. 2, no. 1, p. 12, 2012, doi: 10.4103/2230-973X.96921.
- [2] M. Sihvonen, E. Järvenpää, V. Hietaniemi, and R. Huopalahti, "Advances in supercritical carbon dioxide technologies," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 10, no. 6–7, pp. 217–222, Jun. 1999, doi: 10.1016/S0924-2244(99)00049-7.
- [3] B. Subramaniam, R. A. Rajewski, and K. Snavely, "Pharmaceutical Processing with Supercritical Carbon Dioxide," *J. Pharm. Sci.*, vol. 86, no. 8, pp. 885–890, Aug. 1997, doi: 10.1021/JS9700661.
- [4] P. J. Ginty, M. J. Whitaker, K. M. Shakesheff, and S. M. Howdle, "Drug delivery goes supercritical," *Mater. Today*, vol. 8, no. 8 SUPPL., pp. 42–48, 2005, doi: 10.1016/S1369-7021(05)71036-1.
- [5] K. Byrappa, S. Ohara, and T. Adschiri, "Nanoparticles synthesis using supercritical fluid technology - towards biomedical applications," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 60, no. 3, pp. 299–327, Feb. 2008, doi: 10.1016/J.ADDR.2007.09.001.
- [6] T. Koga et al., "Low-density polymer thin film formation in supercritical carbon dioxide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 21, pp. 4309–4311, 2003, doi: 10.1063/1.1629799.
- [7] T. Koga et al., "The Role of Elasticity in the Anomalous Swelling of Polymer Thin Films in Density Fluctuating Supercritical Fluids," 2003, doi: 10.1021/ma021265w.
- [8] X.-T. Zhou et al., "Dynamics of polymer thin films in supercritical carbon dioxide You may also like Highly Efficient Aerobic Oxidation of Cyclohexene Catalyzed by Iron(III) Porphyrins in Supercritical Carbon Dioxide Supercritical CO₂ preparation of SBA-15 supported ionic liquid and its adsorption for CO-Review-Supercritical Deposition: A Powerful Technique for Synthesis of Functional Materials for Electrochemical Energy Conversion and Storage."
- [9] T. Koga et al., "Neutron reflectivity study of glassy polymer brushes in density fluctuating supercritical carbon dioxide," *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 42, no. 17, pp. 3282–3289, Sep. 2004, doi: 10.1002/POLB.20179.
- [10] J. M. DeSimone, Z. Guan, and C. S. Elsbernd, "Synthesis of fluoropolymers in supercritical carbon dioxide," *Science (80-.)*, vol. 257, no. 5072, pp. 945–947, 1992, doi: 10.1126/Science.257.5072.945.
- [11] N. Jiang et al., "Novel Effects of Compressed CO₂ Molecules on Structural Ordering and Charge Transport in Conjugated Poly(3-hexylthiophene) Thin Films," *Langmuir*, vol. 32, no. 42, pp. 10851–10860, 2016, doi: 10.1021/acs.langmuir.6b03239.
- [12] M. Asada, P. Gin, M. K. Endoh, S. K. Satija, T. Taniguchi, and T. Koga, "Directed self-assembly of nanoparticles at the polymer surface by highly compressible supercritical carbon dioxide," *Soft Matter*, vol. 7, no. 19, pp. 9231–9238, 2011, doi: 10.1039/c1sm05693j.
- [13] M. Asada et al., "Melt crystallization/dewetting of ultrathin PEO films via carbon dioxide annealing: The effects of polymer adsorbed layers," *Soft Matter*, vol. 10, no. 34, pp. 6392–6403, Sep. 2014, doi: 10.1039/C4SM00683F.
- [14] Y. Higaki, R. Ishige, and A. Takahara, "Fluoropolymer Surfaces/Interfaces," *Handb. Fluoropolymer Sci. Technol.*, pp. 433–450, May 2014, doi: 10.1002/9781118850220.CH19.



IMPROVEMENT OF WOLF LEADER IN THE GREY WOLF OPTIMIZATION

¹ Onur İNAN , ² Mustafa Serter UZER 

¹Selcuk University, Technology Faculty, Computer Engineering Department, Konya, TÜRKİYE

² Selcuk University, Ilgın Vocational School, Electronics and Automation Department, Konya, TÜRKİYE

¹oinan@selcuk.edu.tr, ²msuzer@selcuk.edu.tr

Highlights

- Developing optimization algorithms have advantages such as increasing performance, revenue, and efficiency in various fields, as well as reducing costs.
- In this study, the alpha wolf class, which is also called the wolf leader class in Gray Wolf Optimization (GWO), was improved with Whale Optimization Algorithm (WOA).
- This developed algorithm has been tested with 23 benchmark test functions and 10 CEC2019 test functions.
- After executing the suggested method 30 times, average fitness and standard deviation values were obtained and these findings were evaluated against the literature.
- It has been found that the proposed ILGWO algorithm is promising according to the literature and can be applied in various applications



IMPROVEMENT OF WOLF LEADER IN THE GREY WOLF OPTIMIZATION

^{1*} Onur İNAN , ² Mustafa Serter UZER 

¹ Selcuk University, Technology Faculty, Computer Engineering Department, Konya, TÜRK YE

² Selcuk University, Ilgın Vocational School, Electronics and Automation Department, Konya, TÜRK YE

¹ oinan@selcuk.edu.tr, ² msuzer@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 23.11.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.04.2023)

ABSTRACT: The development of optimization algorithms attracts the attention of many analysts as it has advantages such as increasing performance, revenue, and efficiency in various fields, and reducing cost. Swarm-based optimization algorithms, which are among the meta-heuristic methods, are more commonly preferred because they are generally successful. In this study, the alpha wolf class, also called the wolf leader class, in the Grey Wolf Optimization (GWO), has been improved with the Whale Optimization Algorithm (WOA). This improved method is called ILGWO. To evaluate the ILGWO, 23 benchmark test functions, and 10 CEC2019 test functions were used. After running 30 iterations of the suggested algorithm, average fitness and standard deviation values have been acquired; these findings have been compared to the literature. Based on the literature's comparisons of the algorithms, the ILGWO algorithm has achieved the most optimal result in 5 of 7 functions for unimodal benchmark functions, 3 of 6 functions for multimodal benchmark functions, 9 of 10 functions for fixed-dimension multimodal benchmark functions, and 8 of 10 functions for CEC2019 test functions. So the proposed algorithm is generally better than the literature results. It has been found that the suggested ILGWO is encouraging and may be used in a variety of implementations.

Keywords: Grey Wolf Optimization, Alpha Wolf, Whale Optimization Algorithm, Benchmark Test Functions

1. INTRODUCTION

Meta-heuristic optimization methods are used by many researchers because of their advantages, such as being used in various application areas, being easy to apply, and avoiding the local optimum as much as possible [1-4]. The purpose of using nature-inspired meta-heuristics is to aim for the successful solving of real-world and mathematical function problems [5]. For this purpose, new optimization algorithms are constantly being developed, or these enhanced algorithms are combined with existing algorithms to create new ones. In this way, performance and efficiency in applications are increased, and costs and energy consumption are reduced. It is possible to divide meta-heuristic methods into three main categories: swarm-based, physics-based, and evolutionary-based [1]. The literature contains examples of swarm-based optimizations, such as: Artificial Bee Colony (ABC) [3], Harris Hawks Optimization (HHO) [4], Particle Swarm Optimization (PSO) [6], Whale Optimization Algorithm (WOA) [1], Optimal Foraging Algorithm (OFA) [7], Grey Wolf Optimization (GWO) [2], Butterfly Optimization Algorithm (BOA) [8], Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) [9], Optimal Foraging Algorithm (OFA) [7].

GWO and WOA, which are swarm-based methods inspired by nature, have been used in many areas of the literature in recent years. In [10], a hybrid approach, called HGWWO and based on Whale and Grey Wolf Optimization algorithms, is proposed to generate solutions for scheduling problems in cloud tasks. It was proposed in [11] to use a hybrid GWO and genetic WOA to analyze moving objects efficiently. They developed the OWC (Optimal Weighted Centroid) procedure for this hybrid method. A fusion of the WOA and GWO is used in the OWC procedure, which is a dynamic clustering technique for splitting up moving objects. To solve the coordination problem of directional overcurrent relays, a new algorithm that consists of hybrid metaheuristic optimization is presented in the [12]. By using a leadership hierarchy of

the GWO, the proposed method enhances the exploitative phase of the WOA. An integrated landslide modeling framework is described in [13] to reduce the risk of fatalities and financial losses in Anyuan County, China by combining an ANFIS with the two optimization algorithms GWO and WOA. Multi-objective versions of GWO and WOA for resolving bi-objective next release problem (NRP) are presented in [14]. Moreover, four datasets were used to solve NRP problem instances using these two algorithms and three other evolutionary algorithms. In [15], an improved form of the ant-lion optimization algorithm (IALO), using a new boundary reduction procedure, is proposed to solve the image clustering problem. In order to obtain well-separated clusters, an objective function has been developed for image clustering in the literature. This is achieved by minimizing inter-cluster distances and minimizing inter-cluster similarities. Based on the sexual motivation and individual intelligence of chimps in their group hunting, [16]' paper proposes a novel metaheuristic algorithm called Chimp Optimization Algorithm (ChOA). ChOA has been evaluated using both tests and real-world issues. The findings show that ChOA performs better than the other benchmark optimization techniques. A feature selection approach called IWOAIKFS, which includes an improved whale optimization algorithm (IWOA) and improved k-nearest neighbors (IKNN), is proposed in [17]. The experimental findings demonstrate that IWOA not only performs better in optimization while solving benchmark functions of various dimensions but also when IKNN is utilized for feature selection, IWOAIKFS performs better in classification. In order to segment the brain's subregions, a hybrid method that combines the WOA and GWO is suggested in [18]. The suggested approach aids in the diagnosis of Alzheimer's disease. In [19], a new WOA with Gathering strategies (HWOAG) is suggested, and many innovative strategies are collected into WOA for high-dimensional function optimization issues and Fuzzy C-Means (FCM) optimization.

In this study, the development of the alpha wolf class, which is the most important class in the wolf hierarchy and takes important decisions such as hunting, was carried out using WOA in GWO. Since the alpha class in GWO is a class that contains the most important and valuable solutions, it contributes more to the algorithm than other classes. Therefore, it is aimed to improve this class in particular. In addition, since the alpha class is the leader of the wolf pack in nature, this developed method is called the ILGWO algorithm. F1-F23 benchmark test functions and CEC2019 functions are used to measure the performance of ILGWO. It is proved by the results that the ILGWO algorithm is further developed by the GWO. Furthermore, the ILGWO algorithm consistently outperformed other approaches in the literature when these findings were compared to those of other methods. Sections 2 and 3 present, respectively, the GWO and WOA. The ILGWO approach is described in Section 4. The ILGWO method's results are provided in Section 5, along with a comparison of those results to previous research. The ILGWO method's conclusions are provided in Section 6.

2. GREY WOLF OPTIMIZATION (GWO)

GWO is an optimization method improved by Mirjalili et al., emerging from the hunting strategies created by grey wolves according to the hierarchy among them [2]. As displayed in Figure 1, grey wolves are divided into 4 groups in terms of hierarchy: alpha(α), beta(β), delta(δ), and omega(ω). Alpha consists of a female and a male wolf, and they are the lead wolves who make important decisions such as hunting. Beta wolves are the second-ranked wolves who help implement the decisions made by the alpha wolves. Delta wolves are the third-placed wolves, obeying the decisions of the alpha and beta wolves. The bottom of the hierarchy is the omegas. So omegas are the last wolves to be allowed to eat. The three best solutions from the GWO represent alpha (α), beta (β) and delta (δ), respectively, while the remaining candidates' solutions represent omega (ω).

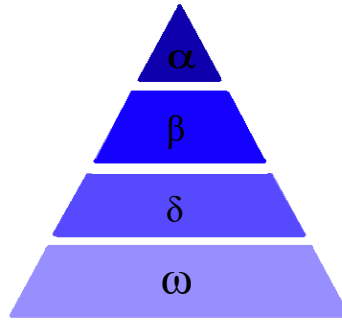


Figure 1. The Grey wolves' hierarchy representation

The GWO method consists of 4 stages: Encircling prey, hunting, attacking prey (exploitation) and search for prey (exploration).

The grey wolves' encirclement of prey is expressed by Eqs. (1) and (2).

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}l(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \tag{1}$$

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}l(t) - \vec{X}(t) \right| \tag{2}$$

where $\vec{X}(t+1)$ is the location of a grey wolf. $\vec{X}l(t)$ indicates the prey's location at iteration i . A and C are the coefficient vectors derived from Eqs. (3) and (4).

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 + \vec{a} \tag{3}$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \tag{4}$$

where \vec{r}_1 and \vec{r}_2 are random numbers in the range of [0,1] and a value are linearly decreased from 2 to 0. By adjusting the A and C vectors, the best agent's nearby new positions can be checked.

After the encircling phase, the search for the best solution begins in the hunting phase. In this phase, alpha guides the hunt, while beta and delta occasionally participate in this process. Thus, grey wolves' location is updated by using Eqs. (5), (6), and (7).

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|, \vec{D}_\beta = \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X} \right|, \vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X} \right| \tag{5}$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \tag{6}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \tag{7}$$

After hunting phase, the phase of attacking the prey begins. When prey stops moving, the grey wolves attack the prey and finish the hunt. This phase is achieved by reducing the value of a . After attacking the prey phase, the phase of search for prey begins. According to the value of A , the search agent looks for better prey at this stage.

To summarize, in the GWO algorithm, the haphazard population is generated. Alpha, beta, and delta wolves forecast the likely prey's position. Then, distance of the candidate solution is updated. Then, a is reduced from 2 to 0 in order to emphasize exploration and exploitation, respectively. Next, If $A < 1$, they go forward the prey. if $A > 1$, they move away from attacking the prey. At long last, the GWO has arrived at an acceptable outcome and is ended [2]. The GWO pseudocode is presented in Figure 2.

```

Initialize the grey wolf population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Initialize  $a, A, C$ 
Calculate the fitness of each search agent
 $X_\alpha$  = The best search agent
 $X_\beta$  = The second best search agent
 $X_\delta$  = The third best search agent
while ( $t <$  Maximum iteration number)
  for each search agent
    Update the position of the current search agent using Eq (7)
  end for
  Update  $a, A, C$ 
  Calculate the fitness of all search agent
  Update  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ 
   $t=t+1$ 
end while
return  $X_\alpha$ 

```

Figure 2. The GWO pseudocode [2]

3. WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM (WOA)

Metaheuristic optimization algorithms have a wide range of use in recent years, as they can produce solutions to problems in different fields. Whale optimization algorithm, one of them, was proposed by Mirjalili and Lewis in 2016. WOA is inspired by the techniques used by humpback whales for bubbling and squeezing the prey into a bubble spiral [1].

Humpback whales collect prey, which usually consists of small fish communities, thanks to air bubbles, then rise to the surface and narrow the circle of target fish by making the movement of narrowing the bubble circle. The representation of hunting whales is given in Figure 3 [1]. WOA consists of the following stages: encircling prey, bubble-net attacking, and searching for prey.

In encircling prey stage, the location of prey is determined by humpback whales and so they wrap prey. Eq. (8) and Eq. (9) are mathematically given this behavior.



Figure 3. The representation of hunting whales [1]

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (8)$$

$$\vec{X}(t+1) = \left| \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \right| \quad (9)$$

where X stands for the position vector, X^* for the optimal solution, and t for the current iteration.

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (10)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (11)$$

Using the variables r , a random vector between 0 and 1, and a , a linearly decreasing value between 2 and 0, the vectors A and C , which are coefficient vectors in Eqs. (10) and (11), are produced. Using the following formula, the a in Eq. (10) is produced:

$$a = 2 - t \frac{2}{MaxIter} \quad (12)$$

The number of iterations is given in Eq. (12) as t , and the greatest number of iterations denoted as $MaxIter$.

The bubble-net attacking stage consists of decreasing encircling movement and spiral movement. The decreasing encircling movement takes place by decreasing a in Eq.(10). The spiral movement occurs by Eq.(13).

$$\vec{X}(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (13)$$

The \vec{D}' is the distance between the whale and its prey in Eq. (13), and l is a random number between -1 and 1. The b indicates the spiral's shape [20].

Whales randomly choose one of these two shaped paths and this situation is symbolized in Eq.(14).

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \text{Use Eq.9} & \text{if } (p < 0.5) \\ \text{Use Eq.13} & \text{if } (p \geq 0.5) \end{cases} \quad (14)$$

During the hunt for prey, the prey is randomly searched by the whale. Hence, vector A , which produces random values, is employed. This mechanism is presented mathematically in Eqs. (15) and (16) [20].

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot X_{rand} - \vec{X} \right| \quad (15)$$

$$\vec{X}(t+1) = X_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (16)$$

Eq.(9) is used in case of $|A| < 1$ and Eq.(16) is used in case of $|A| \geq 1$. In Figure 4, the WOA's pseudocode is given.

```

Create Initial Population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Compute the fitness value of each solution
 $X^*$ =the best solution
while ( $t < Max\_Iteration$ )
  for each solution
    Update  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $l$ , and  $p$ 
    If1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|A| < 1$ )
        Calculate Eq. (9) to update the position of the current solution
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        Select a random solution ( $x_{rand}$ )
        Calculate Eq. (16)
      end if2
    else if1 ( $p \geq 0.5$ )
      Update the position of the current search by the Eq. (13)
    end if1
  end for
  Check if any solution goes beyond the search space and amend it
  Calculate the fitness of each solution If there is a better solution, update  $X^*$ 
   $t=t+1$ 
end while
return  $X^*$ 

```

Figure 4. Pseudocode of the WOA algorithm [1]

4. THE PROPOSED METHOD

GWO optimization may not produce the best solutions for each iteration until it reaches the maximum iteration. In order to improve these bad solutions, the wolf leader of the GWO method was improved with WOA. This improved method is called ILGWO and the flow diagram of the ILGWO method is given in Figure 5. In the ILGWO method, the alpha value of the GWO algorithm is aimed to be the best value to be obtained in the population. For this purpose, if the difference between the old fitness value and the new fitness value in the pure GWO algorithm is smaller than the value determined as a parameter, WOA is run using the same population members. The leader score obtained from WOA is compared with the alpha score obtained from GWO, and if a better WOA leader score is obtained than the alpha score of GWO, the population of WOA is assigned to GWO. Thus, more successful results were obtained.

In this method, the initial population is created first. The first population is given the GWO for the first iteration. In the GWO, the first best fitness value is assigned to the alpha score and its position to the alpha position, according to the fitness function obtained from the initial population. The second best fitness value is assigned to the beta score and its position to the beta position. The third best fitness value is assigned to the delta score and the position to the delta position.

In the GWO algorithm, if the difference between the old fitness value and the new fitness value is less than the value determined as a parameter, WOA is run using the same population members. In WOA, the fitness value is calculated for each search agent in the initial population, and then the processing steps for the WOA are run. Positions are updated according to these transaction steps and the best position is obtained. The fitness value of this best position is then assigned as the Leader score and the position as the Leader position.

Compares the Leader score from WOA with the Alpha score from GWO. If the Leader score is lower than the Alpha score, both the Alpha score will be replaced by the Leader score and the Alpha position will be replaced by the Leader position. To improve optimization in GWO, the current search agent position is updated with a high alpha coefficient and the fitness value of these positions is calculated. According to the updated positions, both the score and the position are updated for alpha, beta, delta. It is aimed to get the best result by performing this operation in each iteration.

5. RESULTS AND DISCUSSION

The F1-23 benchmark functions, which are made up of unimodal, multimodal, and fixed-dimension multimodal, were utilized to test the ILGWO approach. To compare with various methods described in the literature, these functions were used. To accurately compare this study to the literature, the same parameters were utilized as much as feasible, therefore it was attempted to locate papers that had the same parameters. The maximum iteration number, population number, and independent run number for the WOA, PSO, and GWO algorithms, respectively, were utilized in the literature as 500, 30, and 30 [1, 2]. The population number, the maximum number of iterations, and the number of independent runs for the ALO and IALO algorithms, respectively, were used in the literature to be 40, 500, and 30, respectively [15]. The suggested ILGWO algorithm ran each test function 30 times in order to compare with the literature. The independent run number and maximum iteration number were taken as 30 and 500, respectively. From these run data, mean and standard deviation results have been calculated. When the suggested ILGWO has been compared against the GWO, WOA, ALO, PSO, and IALO approaches, it has been discovered that the ILGWO generally produced better results. In Table 1, unimodal F1–F7 functions are listed. *Range* is the limit of the function's search space while *fmin* is the optimum value. A low border is *Lb*, while an upper boundary is *Ub*. *Dim* stands for the size of the function. F1 through F7 functions can evaluate the capacity and performance of the optimization method during the exploitation process.

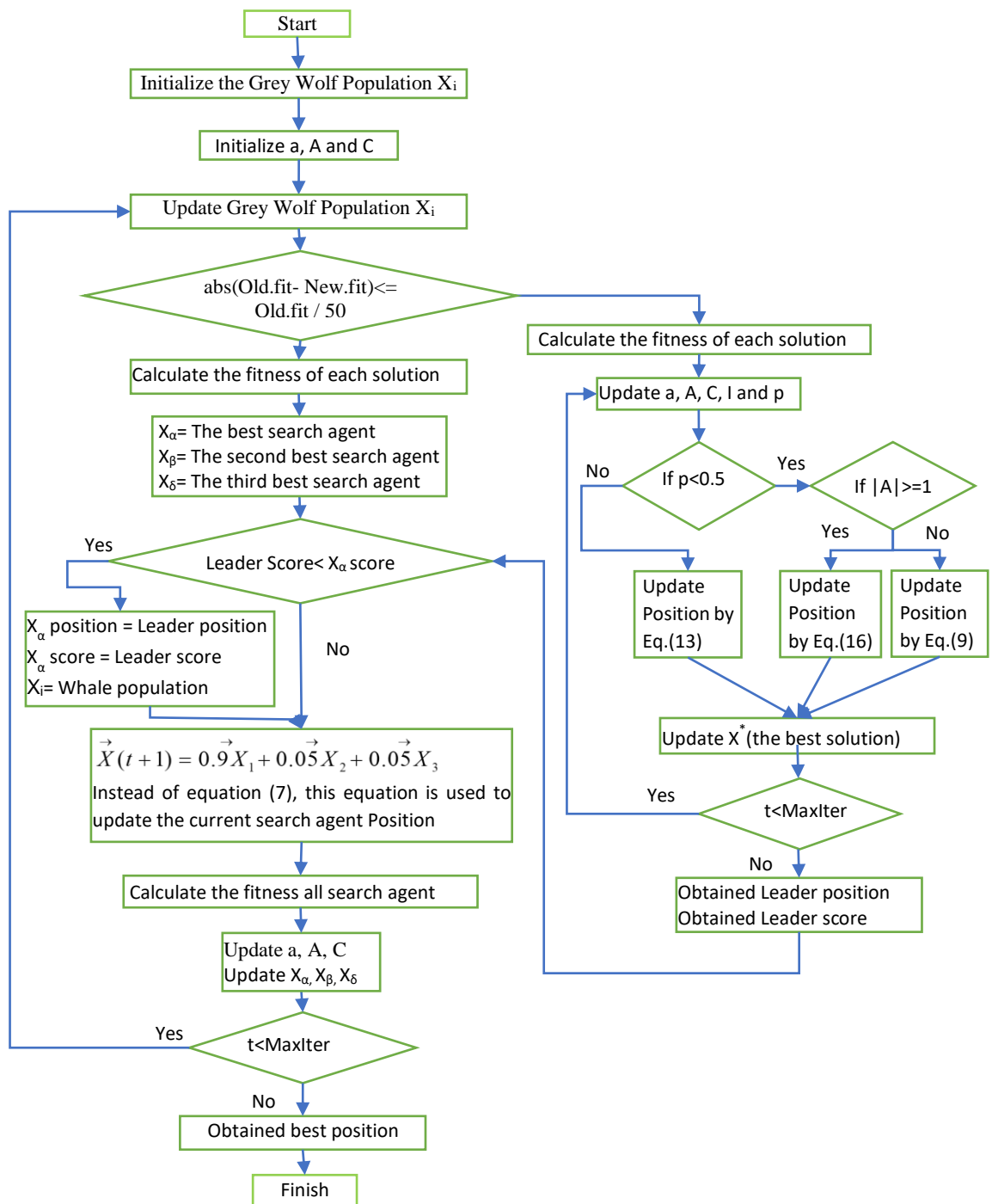


Figure 5. Flowchart of the proposed ILGWO

Table 1. Unimodal functions

Func. Num	Function	f_{min}	Range		Dim
			Lb	Ub	
$F_1(r)$	$\sum_{i=1}^n r_i^2$	0	-100	100	30
$F_2(r)$	$\sum_{i=1}^n r_i + \prod_{i=1}^n r_i $	0	-10	10	30
$F_3(r)$	$\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i r_j)^2$	0	-100	100	30
$F_4(r)$	$\max_i \{ r_i , 1 \leq i \leq n\}$	0	-100	100	30
$F_5(r)$	$\sum_{i=1}^{n-1} [100(r_{i+1} - r_i^2)^2 + (r_i - 1)^2]$	0	-30	30	30
$F_6(r)$	$\sum_{i=1}^n (r_i + 0.5)^2$	0	-100	100	30
$F_7(r)$	$\sum_{i=1}^n ir_i^4 + random[0,1)$	0	-1.28	1.28	30

Unimodal functions' results are presented in Table 2. In 5 of 7 functions for unimodal functions, the ILGWO algorithm produced the best outcome. As a result of the findings, it is evident that the GWO algorithm has been developed. Moreover, ILGWO has been found to be better than the other comparison algorithms except for the F2 and F6 results. WOA produced the best results for F2, while IALO produced the best results for F6. The best examples for F1–F7 functions in search and objective space are given in Figure 6.

Table 2. Unimodal functions' results

F	GWO[2]		WOA[1]		ALO [15]		PSO[1]		IALO [15]		ILGWO	
	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.
F1	6.5900E-28	6.3400E-05	1.4100E-30	4.9100E-30	4.3800E-09	1.8100E-09	1.3600E-04	2.0200E-04	3.6800E-11	1.1400E-10	8.4249E-32	5.5081E-32
F2	7.1800E-17	2.9014E-02	1.0600E-21	2.3900E-21	5.5354E-01	1.3245E+00	4.2144E-02	4.5421E-02	3.4600E-04	7.7400E-04	7.0959E-21	3.0817E-21
F3	3.2900E-06	7.9150E+01	5.3900E-07	2.9300E-06	6.5900E-04	8.3500E-04	7.0126E+01	2.2119E+01	5.7663E-01	6.2807E-01	3.3126E-10	2.6852E-10
F4	5.6100E-07	1.3151E+00	7.2581E-02	3.9747E-01	8.5600E-04	1.1980E-03	1.0865E+00	3.1704E-01	2.7898E-02	9.2275E-02	9.6518E-08	3.6654E-08
F5	2.6813E+01	6.9905E+01	2.7866E+01	7.6363E-01	2.7842E+01	6.2201E+01	9.6718E+01	6.0116E+01	3.4984E+02	7.4489E+02	2.5789E+01	2.9517E-01
F6	8.1658E-01	1.2600E-04	3.1163E+00	5.3243E-01	4.6200E-09	2.2200E-09	1.0200E-04	8.2800E-05	4.5400E-11	1.7600E-10	7.6812E-01	2.1301E-01
F7	2.2130E-03	1.0029E-01	1.4250E-03	1.1490E-03	1.5767E-02	9.8230E-03	1.2285E-01	4.4957E-02	1.3740E-02	9.3790E-03	4.04897E-04	1.4293E-04

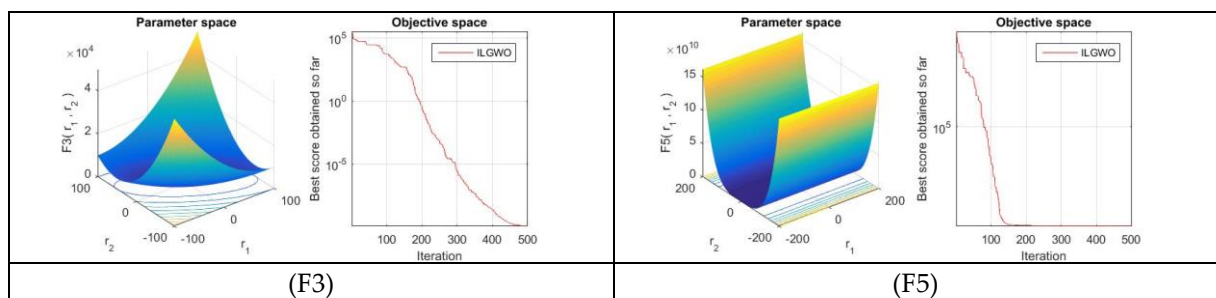


Figure 6. The best examples for F1–F7 functions in search and objective space

Table 3 lists multimodal F8-F13 functions. F8-F13 functions can assess an optimization algorithm's strength in terms of its ability to avoid local optima since in order to attain the global optimum, the optimization algorithm must attempt to avoid all local optima.

Table 3. Multimodal functions

Func. Num	Function	f_{min}	Range		Dim
			Lb	Ub	
$F_8(r)$	$\sum_{i=1}^n -r_i \sin(\sqrt{ r_i })$	-418.9829x5	-500	500	30
$F_9(r)$	$\sum_{i=1}^n [r_i^2 - 10 \cos(2\pi r_i + 10)]$	0	-5.12	5.12	30
$F_{10}(r)$	$-20 \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2}) - \exp(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi r_i)) + 20 + e$	0	-32	32	30
$F_{11}(r)$	$\frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n r_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos(\frac{r_i}{\sqrt{i}}) + 1$	0	-600	600	30
$F_{12}(r)$	$\frac{\pi}{n} \{ 10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 \}$ $+ \sum_{i=1}^n u(r_i, 10, 100, 4)$ $y_i = 1 + \frac{r_i + 1}{4} \quad u(r_i, a, k, m) = \begin{cases} k(r_i - a)^m & r_i > a \\ 0 & -a < r_i < a \\ k(-r_i - a)^m & r_i < -a \end{cases}$	0	-50	50	30
$F_{13}(r)$	$0.1 \{ \sin^2(3\pi r_1) + \sum_{i=1}^n (r_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi r_i + 1)] \}$ $+ (r_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi r_n)] \} + \sum_{i=1}^n u(r_i, 5, 100, 4)$	0	-50	50	30

Table 4 displays the outcomes of the multimodal functions. In 3 of the 6 multimodal comparison functions, the ILGWO algorithm produced the best result. According to the results of F8-F13, half of the results are improved. F9-F11 has been found to be better than the other comparison algorithms. ALO produced the best results for F8 and F13, while PSO produced the best results for F12. The best examples for multimodal functions in search and objective space are given in Figure 7.

Table 4. Multimodal functions' results

F	GWO[2]		WOA[1]		ALO [15]		PSO[1]		IALO [15]		ILGWO	
	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.
F8	-6.1231E+03	-4.0874E+03	-5.0808E+03	6.9580E+02	-2.4391E+03	4.4985E+02	-4.8413E+03	1.1528E+03	-2.8191E+03	3.1346E+02	-7,1924+03	2,4306+02
F9	3.1052E-01	4.7356E+01	0	0	1.9402E+01	1.1247E+01	4.6704E+01	1.1629E+01	1.4725E+01	5.0693E+00	0	0
F10	1.0600E-13	7.7835E-02	7.4043E+00	9.8976E+00	2.9240E-01	6.1341E-01	2.7602E-01	5.0901E-01	7.8411E-01	1.0061E+00	2,81256E-14	3,14091E-15
F11	4.4850E-03	6.6590E-03	2.8900E-04	1.5860E-03	2.2125E-01	1.0754E-01	9.2150E-03	7.7240E-03	2.0489E-01	1.0017E-01	0	0
F12	5.3438E-02	2.0734E-02	3.3968E-01	2.1486E-01	1.4850E+00	1.7889E+00	6.9170E-03	2.6301E-02	1.1932E-01	2.3377E-01	4,4980E-02	7,2107E-03
F13	6.5446E-01	4.4740E-03	1.8890E+00	2.6609E-01	7.0100E-04	3.8380E-03	6.6750E-03	8.9070E-03	2.1990E-03	4.4720E-03	8,2727 E-01	1,2069 E-01

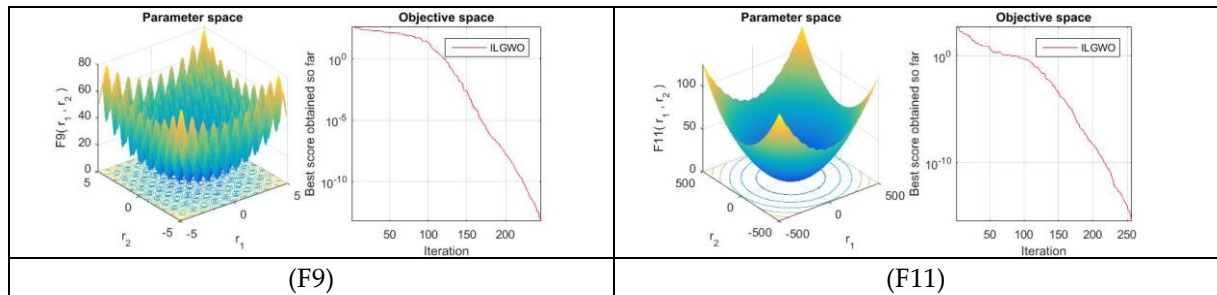


Figure 7. The best examples for F8–F13 functions in search and objective space

Table 5 presents fixed-dimension multimodal F14-F23 functions. Since optimization algorithms must keep the balance between the exploitation and exploration stages of the search process, F14–F23 functions can evaluate this balance.

Table 5. Fixed-dimension multimodal F14-F23 functions

Func. Num	Function	f_{min}	Range		Dim
			Lb	Ub	
$F_{14}(r)$	$(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (r_i - a_{ij})^6})^{-1}$	1	-65	65	2
$F_{15}(r)$	$\sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{r_1(b_i^2 + b_i r_2)}{b_i^2 + b_i r_3 + r_4} \right]^2$	0.00030	-5	5	4
$F_{16}(r)$	$4r_1^2 - 2.1r_1^4 + \frac{1}{3}r_1^6 + r_1r_2 - 4r_2^2 + 4r_2^4$	-1.0316	-5	5	2
$F_{17}(r)$	$(r_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}r_1^2 + \frac{5}{\pi}r_1 - 6)^2 + 10(1 - \frac{1}{8\pi})\cos r_1 + 10$	0.398	-5	5	2
$F_{18}(r)$	$[1 + (r_1 + r_2 + 1)^2(19 - 14r_1 + 3r_1^2 - 14r_2 + 6r_1r_2 + 3r_2^2)] \times [30 + (2r_1 - 3r_2)^2 \times (18 - 32r_1 + 12r_1^2 + 48r_2 - 36r_1r_2 + 27r_2^2)]$	3	-2	2	2
$F_{19}(r)$	$-\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^3 a_{ij}(r_j - p_{ij})^2)$	-3.86	1	3	3
$F_{20}(r)$	$-\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^6 a_{ij}(r_j - p_{ij})^2)$	-3.32	0	1	6
$F_{21}(r)$	$-\sum_{i=1}^5 [(R - a_i)(R - a_i)^r + c_i]^{-1}$	-10.1532	0	10	4
$F_{22}(r)$	$-\sum_{i=1}^7 [(R - a_i)(R - a_i)^r + c_i]^{-1}$	-10.4028	0	10	4
$F_{23}(r)$	$-\sum_{i=1}^{10} [(R - a_i)(R - a_i)^r + c_i]^{-1}$	-10.5363	0	10	4

Table 6 presents the results of the F14-F23 functions. In 9 of 10 functions for fixed-dimension multimodal comparison functions, the ILGWO algorithm produced the best result. As can be seen from the results obtained, the GWO algorithm has been developed. Moreover, ILGWO has been found to be better than the other comparison algorithms except for the F17 results. For the F17, the best performance has been attained by WOA. The best examples for F14–F23 functions in search and objective space are given in Figure 8.

Table 6 F14-F23 functions' results

F	GWO[2]		WOA[1]		ALO [15]		PSO[1]		IALO [15]		ILGWO	
	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.
F14	4.0425E+00	4.2528E+00	2.1120E+00	2.4986E+00	2.7076E+00	2.3599E+00	3.6272E+00	2.5608E+00	1.2295E+00	6.2052E-01	9.9800E-01	7.9583E-12
F15	3.3700E-04	6.2500E-04	5.7200E-04	3.2400E-04	2.8430E-03	5.9450E-03	5.7700E-04	2.2200E-04	2.1910E-03	4.9450E-03	3.0773E-04	2.59658E-07
F16	-1.0316E+00	-1.0316E+00	-1.0316E+00	4.2000E-07	-1.0316E+00	9.8600E-14	-1.0316E+00	6.2500E-16	-1.0316E+00	5.7600E-16	-1.0316E+00	7.78488E-10
F17	3.9789E-01	3.9789E-01	3.9791E-01	2.7000E-05	3.9789E-01	5.5900E-14	3.9789E-01	0.0000E+00	3.9789E-01	0.0000E+00	3.9788E-01	3.15429E-08
F18	3.0000E+00	3.0000E+00	3.0000E+00	4.2200E-15	3.0000E+00	3.3100E-13	3.0000E+00	1.3300E-15	3.0000E+00	4.9300E-15	3.0000E+00	9.81502E-08
F19	-3.8626E+00	-3.8628E+00	-3.8562E+00	2.7060E-03	-3.8628E+00	2.3000E-13	-3.8628E+00	2.5800E-15	-3.8628E+00	2.8900E-12	-3.8603E+00	2.3151E-03
F20	-3.2865E+00	-3.2506E+00	-2.9811E+00	3.7665E-01	-3.2624E+00	6.0657E-02	-3.2663E+00	6.0516E-02	-3.2775E+00	5.9564E-02	-3.3219E+00	3.74551E-06
F21	-1.0151E+01	-9.1402E+00	-7.0492E+00	3.6296E+00	-6.3766E+00	3.2796E+00	-6.8651E+00	3.0196E+00	-7.2848E+00	2.7947E+00	-1.0151E+01	5.0788E-04
F22	-1.0402E+01	-8.5844E+00	-8.1818E+00	3.8292E+00	-7.1015E+00	3.4428E+00	-8.4565E+00	3.0871E+00	-8.3333E+00	3.2587E+00	-1.0402E+01	5.6599E-04
F23	-1.0534E+01	-8.5590E+00	-9.3424E+00	2.4147E+00	-8.2471E+00	3.3601E+00	-9.9529E+00	1.7828E+00	-8.2543E+00	3.3636E+00	-1.0535E+01	3.1834E-04

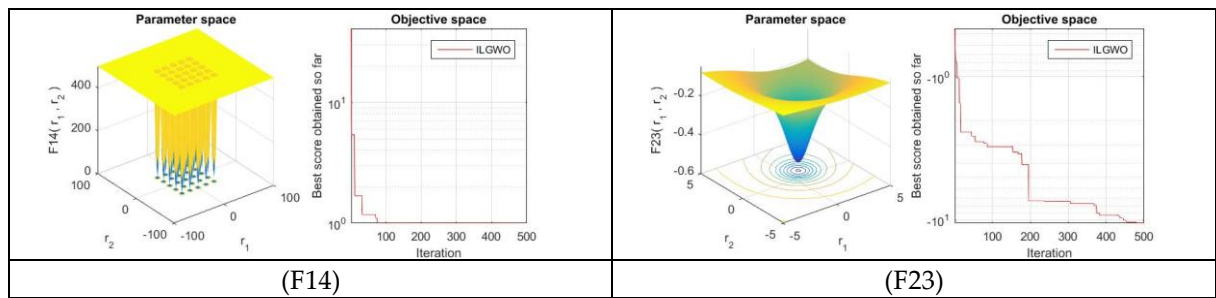


Figure 8. The best examples for F14–F23 functions in search and objective space

There are 10 functions in this contemporary benchmark collection that were created for the CEC conference [21]. For an annual optimization challenge known as "The 100-Digit Challenge," these ten functions were developed. All of these functions have scalable dimensionalities despite having various dimensionalities. Dimensionalities vary between functions CEC01, CEC02 and CEC03 [22]. The dimensionality of the other functions is [-100,100]. Functions for CEC2019 are listed in Table 7 [21, 23].

Table 7. CEC2019 Benchmark Functions

No.	Functions	$F_i^* = F_i(x^*)$	D	Search Range
1	<i>Storn's Chebyshev Polynomial Fitting Problem</i>	1	9	[-8192, 8192]
2	<i>Inverse Hilbert Matrix Problem</i>	1	16	[-16,384, 16,384]
3	<i>Lennard-Joes Minimum Energy Cluster</i>	1	18	[-4, 4]
4	<i>Rastrigin's Function</i>	1	10	[-100, 100]
5	<i>Griewangk's Function</i>	1	10	[-100, 100]
6	<i>Weierstrass Function</i>	1	10	[-100, 100]
7	<i>Modified Schwefel's Function</i>	1	10	[-100, 100]
8	<i>Expand Schaffer's F6 function</i>	1	10	[-100, 100]
9	<i>Happy Cat Function</i>	1	10	[-100, 100]
10	<i>Ackley Function</i>	1	10	[-100, 100]

The CEC2019 functions' results are presented in Table 8. The proposed ILGWO is compared with ChOA, WOA, and GWO. The maximum iteration number, the population number, and the independent run number for this table were used as 500, 30, and 30, respectively. The ILGWO algorithm achieved optimum results in 8 of 10 functions for CEC2019 functions. The best of objective space samples for CEC2019 functions are given in Figure 9.

Table 8. Results of CEC2019 functions

CEC	ChOA[23]		WOA[22]		GWO		ILGWO	
	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.	Ave.	Stan. Dev.
1	4.24E+09	9.67E+09	411E+08	542E+08	7.8299E+08	1.0886E+09	1.2690879E+07	1.6934569E+07
2	1.8408E+01	1.858E-02	1.7349E+01	4.5E-03	1.9847E+01	3.6134E-15	1.984762E+01	3.6134E-15
3	1.37024E+01	7.11E-06	1.37024E+01	0	1.3702E+01	1.9515E-04	1.3702E+01	1.4108E-09
4	5.93262E+03	2.8552E+03	3.9467E+02	2.4856E+02	2.1180E+02	5.5601E+02	4.1676E+01	6.5916E+00
5	4.2094E+00	8.873E-01	2.7342E+00	2.917E-01	2.3266E+00	2.4688E-01	2.1862E+00	3.1306E-02
6	1.2154E+01	6.826E-01	1.0708E+01	1.0325E+00	1.1918E+01	7.9262E-01	1.0102E+01	7.3297E-01
7	1.0071E+03	1.7901E+02	4.9068E+02	1.9483E+02	4.4050E+02	3.1599E+02	1.4273E+01	6.4592E+01
8	6.7846E+00	1.562E-01	6.909E+00	4.269E-01	5.2205E+00	9.2289E-01	3.6725E+00	3.0476E-01
9	4.4927E+02	2.4549E+02	5.9371E+00	1.6566E+00	5.3354E+00	6.9542E-01	4.5957E+00	1.7125E-01
10	2.14985E+01	7.195E-02	2.1276E+01	1.111E-01	2.1501E+01	1.0239E-01	2.0586E+01	3.0153E+00

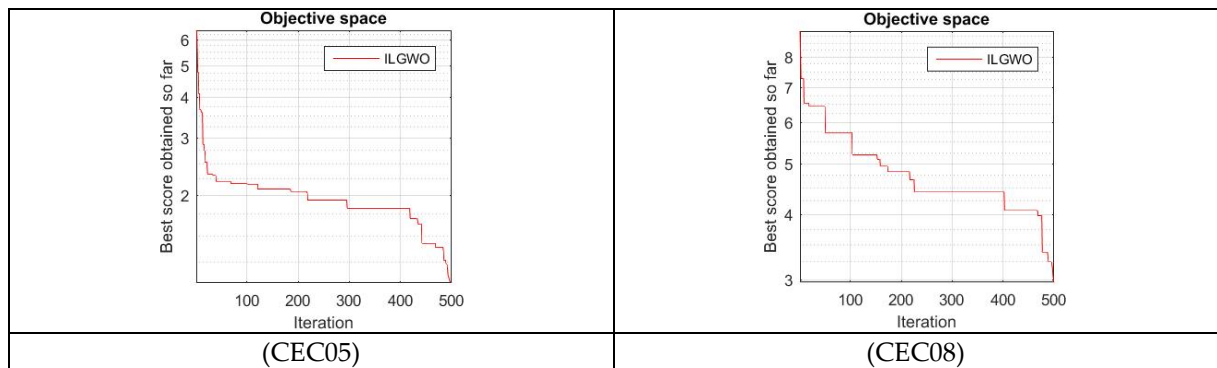


Figure 9. The best of objective space samples for CEC2019 functions

Wilcoxon signed-rank test (p value) statistical comparison of the results obtained by running ILGWO and GWO 30 times is given in Table 9. According to the p-value results of this test, all of the 23 classical functions except F6 and all of the functions of CEC2019 except F2 are less than 0.05, which shows that the proposed ILGWO method is successful in GWO.

Table 9. Wilcoxon signed-rank test (p value) statistical comparison of the ILGWO and GWO

Classical Benchmark	ILGWO vs. GWO	Classical Benchmark	ILGWO vs. GWO	CEC2019 Benchmark	ILGWO vs. GWO
1	1,73E-06	13	2,6E-05	1	1,73E-06
2	1,73E-06	14	1,73E-06	2	1
3	1,73E-06	15	1,73E-06	3	1,73E-06
4	1,73E-06	16	1,73E-06	4	1,92E-06
5	1,73E-06	17	1,73E-06	5	5,32E-03
6	9,915E-01	18	1,73E-06	6	1,73E-06
7	1,73E-06	19	3,41E-05	7	1,73E-06
8	1,73E-06	20	5,22E-06	8	1,73E-06
9	1,6E-06	21	2,6E-06	9	5,22E-06
10	1,63E-06	22	1,73E-06	10	1,73E-06
11	1,56E-02	23	5,75E-06		
12	3,85E-03				

6. CONCLUSION

In this study, the alpha class, which is the top class of grey wolves and called leader wolves, was improved by using the WOA algorithm. Here, because the leader wolf was improved in the GWO, this method was named ILGWO. Since the basis of optimization is to increase efficiency and reduce costs, these objectives were targeted in the development of this ILGWO algorithm. For testing the efficiency of this algorithm, 23 mathematical functions were used. The proposed method has been run 30 times. Later, the average fitness and standard deviation values were compared with those in the literature. The ILGWO was compared with the WOA, GWO, ALO, PSO, and IALO algorithms. It was found that ILGWO achieved the best results in 5 of 7 tests for unimodal benchmarks, 3 of 6 tests for multimodal benchmarks, and 9 of 10 tests for fixed-dimension multimodal benchmarks. In addition, 10 CEC2019 test functions were used to evaluate the ILGWO, and it has been compared with the WOA, GWO, and ChOA methods. It has been found that ILGWO achieved the best results in 8 of the 10 tests for the CEC 2019 benchmarks. As a consequence, the suggested method performs better than the results from the literature in general. Also, objective space sample representations of the test functions are given.

According to the results, the proposed ILGWO method appears to be promising. In addition, it has been revealed that it can be used in engineering applications. It is planned to test the proposed method in more test functions and engineering implementations. We also want to use this strategy to develop various hybrid approaches.

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

OI and MSU conducted the literature review of the manuscript and the design of the proposed method together. It also contributed equally to obtaining the results of the proposed method and interpreting the results. MSU and OI read and approved the final manuscript.

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 are grateful to Selcuk University Scientific Research Projects Coordinatorship for support of the manuscript.

Data Availability

Research data has not been made available in a repository.


REFERENCES

- [1] S. Mirjalili, and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51-67, May, 2016.
- [2] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, Mar, 2014.
- [3] D. Karaboga, and B. Basturk, "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 8, no. 1, pp. 687-697, Jan, 2008.
- [4] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. L. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems-the International Journal of Escience*, vol. 97, pp. 849-872, Aug, 2019.
- [5] G. G. Wang, and L. H. Guo, "A Novel Hybrid Bat Algorithm with Harmony Search for Global Numerical Optimization," *Journal of Applied Mathematics*, 2013.
- [6] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle swarm optimization." pp. 1942-1948.
- [7] G. Y. Zhu, and W. B. Zhang, "Optimal foraging algorithm for global optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 51, pp. 294-313, Feb, 2017.
- [8] S. Arora, and P. Anand, "Binary butterfly optimization approaches for feature selection," *Expert Systems with Applications*, vol. 116, pp. 147-160, Feb, 2019.
- [9] S. Saremi, S. Mirjalili, and A. Lewis, "Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application," *Advances in Engineering Software*, vol. 105, pp. 30-47, 2017/03/01/, 2017.

- [10] J. Ababneh, "A Hybrid Approach Based on Grey Wolf and Whale Optimization Algorithms for Solving Cloud Task Scheduling Problem," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, Sep 13, 2021.
- [11] T. Mahalingam, and M. Subramoniam, "A hybrid gray wolf and genetic whale optimization algorithm for efficient moving object analysis," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, no. 18, pp. 26633-26659, Sep, 2019.
- [12] A. Korashy, S. Kamel, F. Jurado, and A. R. Youssef, "Hybrid Whale Optimization Algorithm and Grey Wolf Optimizer Algorithm for Optimal Coordination of Direction Overcurrent Relays," *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 6-7, pp. 644-658, Apr 21, 2019.
- [13] W. Chen, H. Hong, M. Panahi, H. Shahabi, Y. Wang, A. Shirzadi, S. Pirasteh, A. A. Alesheikh, K. Khosravi, S. Panahi, F. Rezaie, S. Li, A. Jaafari, D. T. Bui, and B. Bin Ahmad, "Spatial Prediction of Landslide Susceptibility Using GIS-Based Data Mining Techniques of ANFIS with Whale Optimization Algorithm (WOA) and Grey Wolf Optimizer (GWO)," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, pp. 3755, 2019.
- [14] M. Ghasemi, K. Bagherifard, H. Parvin, S. Nejatian, and K. H. Pho, "Multi-objective whale optimization algorithm and multi-objective grey wolf optimizer for solving next release problem with developing fairness and uncertainty quality indicators," *Applied Intelligence*, vol. 51, no. 8, pp. 5358-5387, Aug, 2021.
- [15] M. Toz, "An improved form of the ant lion optimization algorithm for image clustering problems," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 27, no. 2, pp. 1445-1460, 2019.
- [16] M. Khishe, and M. R. Mosavi, "Chimp optimization algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 149, pp. 113338, 2020/07/01/, 2020.
- [17] W. Liu, Z. Guo, F. Jiang, G. Liu, D. Wang, and Z. Ni, "Improved WOA and its application in feature selection," *PLoS One*, vol. 17, no. 5, pp. e0267041, 2022.
- [18] C. Dhakhinamoorthy, S. K. Mani, S. K. Mathivanan, S. Mohan, P. Jayagopal, S. Mallik, and H. Qin, "Hybrid Whale and Gray Wolf Deep Learning Optimization Algorithm for Prediction of Alzheimer's Disease," *Mathematics*, vol. 11, no. 5, pp. 1136, 2023.
- [19] X. Zhang, and S. Wen, "Hybrid whale optimization algorithm with gathering strategies for high-dimensional problems," *Expert Systems with Applications*, vol. 179, pp. 115032, 2021/10/01/, 2021.
- [20] M. Mafarja, and S. Mirjalili, "Whale optimization approaches for wrapper feature selection," *Applied Soft Computing*, vol. 62, pp. 441-453, Jan, 2018.
- [21] K. Price, N. Awad, M. Ali, and P. Suganthan, "The 100-digit challenge: problem definitions and evaluation criteria for the 100-digit challenge special session and competition on single objective numerical optimization," *Nanyang Technological University*, 2018.
- [22] J. M. Abdullah, and T. Ahmed, "Fitness Dependent Optimizer: Inspired by the Bee Swarming Reproductive Process," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43473-43486, 2019.
- [23] H. Mohammed, and T. Rashid, "FOX: a FOX-inspired optimization algorithm," *Applied Intelligence*, vol. 53, no. 1, pp. 1030-1050, 2023/01/01, 2023.



ENGINEERING REQUIRED TO HAVE SAFE STRUCTURES IN/ON THE EARTH CRUST AND EUROCODE 7

*Mehmet Kemal GÖKAY 


Konya Technical University, Engineering & Natural Sci. Faculty, Mining Engineering Dept. Konya, TÜRKİYE
mkgokay@ktun.edu.tr

Highlights

- Ground engineers' responsibilities have not been changed at all. They have to supply evaluations for stable spaces and structures for urban life in/on earth crust as they have always been required.
- Engineers dealing with earth for its properties, features, stabilities for different engineered structures like; dam, bridge, tunnel, mine gallery & stopes, pits, foundations of buildings etc. have their tough decisions under various uncertainties.
- Some European countries have gradually provided specifications to define ground engineering under EUR-ING qualifications.
- Rock engineering contributions to ground engineering have been assessed here by pointing Eurocode 7 progresses in time.
- In general, legal procedures may be started to check engineering standards, engineers' responsibilities and their professions, material qualities and documentations, structural designs, laboratory test results, official design approval procedures, foundation tests and their stability analyses etc., for detailed research.
- Therefore, engineers should certainly define their professions, expertise and responsibilities according to supplied standards. Thus, they should restrict themselves from getting loaded responsibilities and uncover their certificated professions and expertise.
- Engineering applications related to earth crust require excavations in soil and rock formations.
- Different types of surface and underground excavations could possibly be realised through diverse engineering designs due to their specific requirements.
- Engineering branches which have concentrated different aspects of works in/on earth crust have wide ranges of knowledge and experiences for ground engineering including in Eurocode 7 applications.
- Combination efforts of ground engineers have increasingly provided new dimensions and research areas for the stability concerns of engineered structures in/on earth crust (rock/soil masses).



ENGINEERING REQUIRED TO HAVE SAFE STRUCTURES IN/ON THE EARTH CRUST AND EUROCODE 7

*Mehmet Kemal GÖKAY 

Konya Technical University, Engineering & Natural Sci. Faculty, Mining Engineering Dept. Konya, TÜRKİYE
mkgokay@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 09.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.01.2023)

ABSTRACT: While engineering has recently been presented in medias by computers and laboratory outfits, responsibilities of ground engineers who perform works in/on earth crust have not been changed at all. They have to supply stable spaces and structures for urban life in/on earth as they have been always required. Engineers dealing with earth for its properties, features, stabilities for different civil work circumstances like; dam, bridge, tunnel, mine gallery & stopes, pits, foundations of buildings etc. have their tough decisions under various uncertainties. They have recently been categorised as ground engineers including, soil and rock engineers, geotechnics, geomechanics, geologist, civil and mining engineers etc. subjects. Some European countries have gradually provided specifications to define ground engineering under EUR-ING qualifications. Engineers who have been controlling product qualities, organising works for employees, testing in laboratories have their work places which have not been changed regularly, as it is the case for ground engineers. Rock engineering, (concepts based mainly on rock mechanics in geology, mining and civil engineering) contributions to ground engineering have been worked here under Eurocode 7 applications and evaluations performed by engineers.

Keywords: Eurocode 7, Ground Engineering, Rock Mechanics, Soil Mechanics, Geotechnics, Geomechanics, Eur-Ing

1. INTRODUCTION

Earth crust contents vary in different parts of the globe and supply requirements for humans and their civilisations. Engineers dealing with geology and geophysics have their works on formation and structures of rocks and soils layers shaped in geological eras. Civil engineers in soil mechanics subjects and rock engineers have works to understand soil & rock materials and their behaviours. Beside the usage of rocks and soils as construction materials in different human related activities, especially excavation and construction works for safe & stable spaces in/on earth crust for different usage purposes have been evaluated here to present rock engineering contribution in ground engineering concept.

Different types of open spaces, volumes, in/on rock masses have been designed & engineered for their shapes, dimensions, stabilities, ventilation (air quality and temperature suitability) properties etc. to comfort human requirements. These spaces have been supplied by mining and civil engineering construction works in/on the crust through history. It has been already known that, caves, sinkholes, underground city spaces, houses, buildings, skyscrapers and other types of structures have their unceasingly changing stability conditions which are partly depended on earth crust properties and their structural features. The earth mass has various types of soil and rock formations. Their behaviours under different stress conditions together with variable water & gas contents have been researched for several engineering purposes. For these purposes, the first task is often the discontinuity analysis to reveal the deterministic features of discontinuities such as cracks, joints, faults in different rock masses. Rock masses; massive, dry, saturated, fissured, fractured, swelling types etc. have been diversely researched to define more comprehensive explanations for their stability cases in engineering activities. Discontinuities supply weakness surfaces in fractured rock masses which should be evaluated for their positive and negative influences on engineered projects. These projects can be designed to realise in/on rock masses. Material

properties of rock and soil masses and their structural features have common bases in some limits to be tested. Decisions, on the other hand, which should be supplied by ground engineering evaluations have supposed to cover whole aspects of earth crust (soil & rock masses). Understanding behaviours of soil and rock masses have gradually released the decision burdens over ground engineers in last decades. Supplying decisions for suitability of designs related with rock & soil masses have their own risks which are related with uncertain rock & soil features, (due to their natural characteristics). Experiences gained for certain earth localities and regions have played important roles in design decisions supplied for foundations, tunnel excavations & supports, slope reinforcement etc.

Eurocode 7 has recently started to be applied for ground engineering cases as a standard, (including risk evaluations as well). Engineers who work on soil and rock engineering fields have supplied their experiences and research results to point their evaluations related with Eurocode 7 applications. This study realised here have focused mainly on rock engineering evaluation of those researchers to present importance of joint works for the cases of Eurocode 7 allegations. At this point, it is required to mention statements of Alejano et al. [1] reported by Vagnon et al. [2] that, engineers had considered and followed standard code EN1997-1, [3], (called as Eurocode 7, EC7), as a reference design code for their geotechnical design circumstances in ground engineering cases in the CEN, (European Committee for Standardization), member countries. Their designs have possibly included rock engineering related subjects whenever necessary. Thus, Eurocode 7 has gradually become comprehensive standard application due to its new concerns & attitudes in ground engineering considerations in CEN countries. Actually, there are several other states which are not members of CEN are also aimed to follow Eurocode 7 procedures as well [4]. Understanding the background features of Eurocode 7 and related rock engineering impacts have progressively revealed more realistic engineering strategies in ground engineering projects.

2. GROUND ENGINEERING CONSIDERATION IN CONTENT OF EUROCODE 7

European countries have followed several engineering standards in national bases but, they have gradually enforced to follow common European standards. They are commonly called as Eurocodes and one of them is EC7 and it is related with ground engineering, geotechnical, geomechanical features of earth crust. In the cases of urban areas, foundations of any buildings & constructions and tunnels & infrastructure excavations etc. in Eurozone countries have to be engineered gradually according to EC7. Engineering projects related with earth crust including dam & bridge constructions, metro tunnels & stations, underground passageways, underground storage spaces, underground cities, protection works for caves, sinkholes rehabilitations, mine related excavations and support designs etc. have progressively been planned also according to EC7 for European countries. Usage of Eurocodes can likewise be a manner in engineering mobility for companies and engineers throughout the Eurozone countries. Efforts to develop Eurocodes have their difficulties mentioned in literatures but also have opportunities to reconsider national engineering standards. New approaches and technological developments could also be introduced into standards under developing stages. Engineering efforts supplied in underground excavations, tunnels and all types of space designs as working places in mining operations have to follow strict work & workplace safety and health related legislative rules including environmental and social concerns. These safety rules have gained throughout the mining histories of related nations. Underground metro tunnel excavations, bridge & dam constructions, big scale buildings & industrial plants and other works for modern urban life have also their success and failure stories in their stabilities. Similarly, geomechanical and geotechnical experiences gained for certain regions have collected after performing different works & tests and observing behaviours of foundations for examples through their usages. Civil, mining, geological and geophysical engineers who have extra professions on geotechnics, geomechanics, rock engineering, soil mechanics, foundations, excavation methods etc. have their contract works, project, performed in/on earth crust through different soil and rock masses for years. Each of this profession has its own good practices. Thus, experiences gained in their performances & projects are very valuable assets for our civilisation in this modern world. Engineering standardizations in these areas (related with earth crust) have therefore their own specifications and difficulties under discussions.

Governing authorities in the world on the other hand have their own experiences accumulated through successes and failures of the ground engineering projects. Disasters and aftermaths of them have always their traumas on societies. Coal mining explosions, water intrusions into mines and tunnels, collapse of mine galleries and tunnels, collapses or damages occurred at houses & constructions due to their structure and/or foundation problems, damages occurred at cities and towns partly due to earthquakes, slope failures, landslides, collapsing of the dams and resultant flood disasters etc. have caused many casualties which societies sometimes have difficulties to bear their traumatic scales.

Uncertainties in earth related engineering data have common facts and designing structures in/on earth crust have their approaches & criteria for those uncertain parameters in design stages. The questions have always aroused after those disasters if the casualties and/or collapsing of the urban structures could be prevented by applying different engineering methodologies. Legislative court procedures started after those disasters have their own methodologies which may or may not consider risks related with uncertainties in earth crust related engineering parameters. Engineering standardization in ground engineering efforts therefore, have gradually brought relief to ground engineers, earth crust related projects owners & employers and governing bodies of societies. Engineering standards describe basic rules to follow in engineering applications. Eurocode 7 includes also risk considerations controversially in analyses to cope with unpredicted design factors and uncertainty characteristics of earth crust related data sets. It is basic knowledge that stresses and strains, for example, could not be measured in full scale in surrounding rock masses around tunnels or beneath large scale concrete foundation slabs. That means there are always uncertainties in test measurements, eventually input parameters of engineering designs which should be predicted and modelled by test results but also with experiences of engineers (empirical and observational analyses, numerical approaches etc.).

New approaches and technologies might decrease the number of uncertain parameters in time. But, there are still many of them for current project conditions. Positive aspects of earlier socio-economic, environmental and ground engineering related projects which had been furnished with available theoretical, analytical, observational and numerical solutions have progressively forced governing bodies to pursue their procedures as flagship operations. However, new approaches in earth related projects have their own conditions to be considered. Therefore, there should be methodologies described in engineering standards covering most of the hesitations supplied by related engineers, contractors, project owners, governing bodies, societies etc. Thus, in order to discuss positive and negative influences of engineering standards in ground engineering works, remarks forwarded in the literature should also be taken into considerations. For instance; sentences written by Bolton [5] who stressed on influences of standards on engineering skills put some limitations forward arose due to application of the new standards (EC7 in this content) into words as follows; *"It is therefore possible to imagine optimistically that a new generation of codes might free the engineer from unnecessary constraints by emphasising proper objectives and acceptable methodology while eliminating references to specific guidelines which lawyers might interpret as "rules". It is equally possible, however, that new codes might become even more detailed and specific, offering less scope to the skilful designer, and possibly even forcing him into avenues which his professional judgement warns him are erroneous"*. Similar remarks and their contents are helpful to re-evaluate forwarded EC7 contents to maximise its outcomes to the societies.

3. "ADEQUATE ENGINEER" PHENOMENA IN EUROCODE 7

Eurocode preparations have enlightened one case also, that is requirements of adequate engineers, technicians and workers. Defining "common bases" for different branches of engineers educated and graduated in different European countries has a deal to be resolved. Thus, European engineering definition, EUR-ING in short abbreviation, has emerged to describe engineers who obtain extra certification to play their engineering activities in any European country. At this point it is necessary to mention *"The fédération Européenne d'associations nationales d'ingénieurs"*, FEANI, which was founded in Europe in 1951 to bring together 25 European countries' national engineering associations. Number of members in/out of Europe is currently 34 countries, (including: Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus,

Czech Republic, Denmark, Estonia France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Kazakhstan, Malta, Netherlands, North Macedonia, Norway, Poland, Portugal, Romania, Russia, Serbia, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, Ukraine, United Kingdom, Affiliated member Angola). Purpose of this organisation was defined as “To secure the recognition of European engineering titles and to protect those titles, in order to facilitate the freedom of engineers to move and practise within and outside Europe”, [6]. Thus, defining the engineering education, training, experiences in accepted manners described in FEANI has vitally important for the certification. National education differences in engineering education and their recognition and registration systems (if any) in national engineering associations have stayed as diversity of applications. In FEANI system, engineering types and required education backgrounds have been defined to follow for candidates to be called as a “European engineers”, [6]. In order to perform engineering works, projects or procedures in different European countries, graduates of engineering faculties (or any other types of education systems) should be fulfilled the requirements of the application steps of EUR-ING.

Engineers in “ground engineering” common subject title who work in their projects by following EC7 procedures cover; geotechnical, geomechanical, geological, engineering geology, rock engineering, mining engineering, civil engineering, foundations engineering etc. graduates. Thus, next generations in faculties who would like to be “engineer” and have EUR-ING certificate, must understand the limits and descriptions in FEANI system. In this aspect; descriptions related with certification of EUR-ING engineer in ground engineering is also be documented [7]. European countries such as, Germany, Macedonia, Austria etc. have already started EUR-ING certifications. Moreover, this certification procedure has already started new understanding in engineering and engineering educations in Eurozone countries. Non-European countries which follow European engineering standards for their common economic relations might also accept EUR-ING certifications gradually in time. Discussion and debates have been continued about Eurocodes and EUR-ING applications but, the codes have already accepted together with several years of adaptation periods. In this respect, universities offering engineering educations in Europe should evaluate their programs and courses together with their ECTS credits to follow requirements of Eurocodes and European engineering, EUR-ING, certification procedures. Logically they would like to graduate engineers who have legitimate to apply EUR-ING certifications directly. Requirements of adequate engineering acts in Eurocodes have reshaped, modelled, the future of engineering in different industries in Europe and other countries which have close economical connections & relations.

For the cases of ground engineering Jovanovski et al. [8] mentioned EC7 and requirement of experts in engineering activity covering “ground engineering” subjects. They wrote that “Eurocode 7 (EN 1997, EC7), beside other important aspects, introduces the necessity of qualified and experienced personnel needed for adequate design and safe construction of geotechnical structures”. They pointed out also the works which should be performed by educated & trained experts listed in EN 1997-1, [3], Paragraph 1.3 as; “Data required for design are collected, recorded and interpreted by appropriately qualified personnel; Structures are designed by appropriately qualified and experienced personnel; Execution is carried out according to the relevant standards and specifications by personnel having the appropriate skill and experience”. Engineers, technicians, workers and employers of companies (consulting, design, measuring, excavating, construction, supporting, maintaining etc.) who have works related with earth crust should realise that, their projects in Europe have to be started & finished by following standard rules supplied in EC7. European countries have education and diploma procedures for their educated human resources in engineering in different manners. ECTS credit system has been offered to supply common platform for European university educations. However, Jovanovski et al. [8] pointed that “The question is how to insure “common platform” for necessary requirements and qualifications for engineers and to find a legal definition consistent with the European Directive 2005/36/EC on Recognition of Professional Qualifications in engineering disciplines”. According to these authors “This question is maybe most complex for professionals involved in ground engineering, because geotechnics deals with variety of problems, covered by engineering geology, soil mechanics, rock mechanics, foundation engineering, risks, environment etc.”. Description of engineers who should perform required works and analyses to supply

reports and decisions as they are required in EC7 has complicated and several branches of engineering associations had been asked earlier to resolve meaningful procedures. On this subject, Bock et al. [9] and then Buggy et al. [10] reported about, a Joint European Working Group, JEWG. They wrote that JEWG was established in July 2002, and this group had included joint efforts of International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), International Association for Engineering Geology and Environment (IAEG), and International Society for Rock Mechanics (ISRM) to provide common understanding in required engineering activities in EC7. Jovanovski et al. [8] pointed also that; *"JEWG intensively works on the problem of qualification requirements in EC7. Moreover, it held three workshops: in Leuven (2016), Oslo (2017) and Reykjavik (2019)"*. These authors pointed also that, the JEWG early report in 2008 presented that *"An idea for professional competencies of all three primary disciplines (soil and rock mechanics and engineering geology) in terms of key and general competences, as well as specialized fields for work in ground engineering"*. Bock et al. [11] wrote on "qualification" description also for ground engineering. These authors mentioned on the German Geotechnical Society, (DGGT) procedures and pointed that *"Neither EN 1997 nor the various national annexes and/or Building Codes specify precisely what these "appropriate" qualification and experience requirements might be"*. They wrote that unclear description of qualified people performing EC7 reports and documentations will *"opens the door for all sorts of self-declared "experts" to carry out ground investigations and to submit Ground Investigation and Geotechnical Design Reports"*. According to them this situation is *"The detriment of safety"*. The German Geotechnical Society (DGGT) had previously worked also on the subject and presented a document titled; *"Geotechnical Professionals Requirements on qualification and experience"*, [12]. Approaches to define ground engineering considerations in EC7 subjects have still under considerations through joint efforts. Engineering societies in European countries like the other countries have members graduated from predetermined departments of universities. They supply engineering decisions through reports in different subjects of earth crust for example according to their engineering education background. Logically, societies which have high enrolments (as official members) in a country, have focused more about their engineering branches during categorising subjects of interest related with "ground engineering". Truly, engineering works, applications in/on earth crust have gradually been complicated while the urban populations and their necessities are also increased. Almost carbon-free energy harvesting through geothermal projects, urban spaces in underground, deeper open pit and underground mines, foundation designs for high-rise buildings etc. have pushed scale of ground engineering dealing with earth crust further away from the regular considerations. Lamas et al. [13] evaluated EC7 facts by considering involved engineering subjects under discussions. They critically pointed that; *"Introduction of EC7, bringing structural safety concepts in geotechnical design, was an important step forward in many European countries. It is interesting to note that several European countries, with well-established codes for structural design of buildings and bridges, had no code for geotechnical design before EC7"*. Engineers reporting currently about soil properties for construction companies can be different in different countries. They can be graduated different branches of engineering and earth sciences, such as; civil engineering, foundation engineering, engineering geology, geology, geotechnics, geomechanics, etc. Defining safety of engineering projects in/on earth crust (weak soil, soil, hard soil, hard soil-soft rock, weak rock, rock, hard rock etc. masses) needs adequate engineering considerations including risk of failure decisions as well.

Availability of detail building codes related with construction bodies (concrete types, properties of applicants etc.) but less concentration on buildings' foundations (properties of soils and rocks masses) might be the results of different considerations in earlier times. However, modern urban life enforcements to have higher & heavier buildings; deeper infrastructures (including metro lines and underground living spaces and depositories); bigger ports & industrial plants; deeper mine activities etc. have progressively transformed design efforts and considerations in last decades. Discussions on earth crust properties and behaviours may continue among the earth mass related engineering professions but, currently engineers (or groups of engineers in consulting companies) might have been in a position to supply ground related decisions for their planned projects. Those decisions should be taken with the requirements related with official ground engineering evaluations on the bases of EC7 if the rules are applicable in that country.

Therefore, any discussions, *“Regarding applicability of the design principles of the Eurocodes to geotechnical structures, and also regarding its application in practice to geotechnical construction works”*, should be resolved, [13]. These researchers pointed in 2014 also that rock engineering subjects are missing in EC7. According to them, the reason of this gap has been originated due to soil related subjects & problems dominations in EC7. Design and other efforts supplied for engineered structures, such as; dams, bridges, tunnels, mine, buildings, constructions, etc. in/on the rock masses should also be included in EC7 coverage.

Rock engineers and related researchers have mainly mining, petroleum and geological engineering backgrounds. EC7 have soil engineering background in early version, so rock mechanics issues had not included to the code as far as required. However, as already point before, designing for soil and rock masses differs due to nature of the engineered masses. Soil can be somehow considered continuum material but, rock masses have discontinuities and they cannot be issued as massive or continuum media. Underground spaces opened in rock masses have required special design considerations supplied in rock and soil mechanic texts. Each underground space has its own local design conditions originated through the earth crust parts surrounding. Moreover, even the same engineered volume design in underground can possibly have different surrounding rock formations. Therefore, different engineering procedures for example have suggested in rock engineering for different rock behaviours. Thus, defining standard procedures for rock and soil engineering assets have application difficulties. In addition, these earth crust masses have their uncertainties in their property tests and behavioural analyses & considerations. Decisions given through earth crust properties & behaviours for designed spaces in/on the crust have their responsibilities related with engineering, social and environmental considerations. Therefore, engineers and related consultant and engineering companies have full load of their decisions and works. Legal and moral responsibilities of these decisions in ground engineering have reasonably forced these engineers to deal with more secure sections of the projects. Actually, defining responsibilities of a project without mentioning uncertainties in input data (mostly related with properties and behaviours of earth crust) is not fair. Experiences have played important roles here to handle those data to produce reasonable conclusive decisions. Risks of misjudgement encountered here also possible to predict actual facts (full scale behaviours, stresses, strains, properties etc.) related with rock and soil masses. Descriptions, (coverage), of methods in excavation design or similar activities are not directly supplied, because earth crust conditions for each project are different. Similar considerations stated by Koc [14] as; *“It is not clearly stated that in the Eurocode how the tunnels should be designed”*. Feeling engineering responsibilities of contracted projects in/on earth crust have forced the engineers in creative but stressed work environments. Due to numerous design factors; uncertainties related with collected input data; results of analyses based on criteria, (approaches, numerical iterations etc.), it should be logical that ground engineers would like to supply their decisions with associated risks of coverage.

Quality of engineering works, analyses, designs, and adequate engineering on related subjects (together with reliable collected inputs, data) make the differences among the offered or realised projects in/on earth crust. Olsson & Palmström [15] wrote that *“The Eurocodes were initiated for bridge construction, and have then been applied in more and more applications, such as in soil mechanics and finally in rock engineering”*. That means the official standards are not fully descriptive at their early versions, they are getting reliable as the reviews have been recognised and performed.

4. RESPONSIBILITY OF ENGINEERS: PROFESSIONS, DECISIONS AND LIABILITY

Engineers deal with soils and rock masses to provide engineered structures & spaces for urban requirements have pressured to define their subjects and responsibilities in more detail in social disputes when there are legislative sessions after failure of any urban structure or space with fatalities. Casualties (if there is any) especially are main engineering concerns. When social and governing bodies' efforts related with the failures (or disasters) turn into official investigations to determine the failure causes, all the design and operational documents can be asked for re-evaluation. In addition, failure of urban structures can also be occurred due to earthquakes, slope failures, landslides, sinkholes, caving etc.

Researches have also been performed to analyse main causes of collapses and damages. In similar cases, (i.e. exemplified hypothetically here), engineers worked for such a project have to define their duties, positions and responsibilities through their field of professions and professional applications according to national and international standards and rules. In general, legal procedures may be started to check engineering standards, engineers' responsibilities and their professions, material qualities and documentations, structural designs, laboratory test results, official design approval procedures, foundation tests and their stability analyses etc., for detail researches. Therefore, engineers should certainly define their professions, expertise and responsibilities according to supplied standards. Thus, they should restrict themselves for getting loaded responsibilities uncover their certificated professions and expertise. Buggy and Franzén [16] wrote about their evaluation about "ground engineering" concept. They concluded that, *"Given the critical role of ground engineering professionals in the planning, design and construction of major infrastructure, industrial, mining, commercial and residential development in the modern world, it is readily apparent that the interests of both public safety and the minimisation of economic losses from failure are served by having qualified and competent persons perform these services"*. These researchers analysed also the registration of engineers for the cases of EC7 in different European countries. These countries have different procedures followed already and they concluded that, *"a common platform fully compliant with EU Directive 2005/36/EC is a much more distant aspiration which requires many more countries to participate and is unlikely to be achieved in the short term"*.

5. ROCK ENGINEERING CONSIDERATIONS AND EC7

Usages of underground spaces and facilities have common practices gradually. Accessibility supplied by underground metro tunnels and additional underground spaces designed for shopping centres, car parks, sport centres, passageways have already under practices. Engineering activities related with them cover rock and soil mass considerations. Harrison et al. [4] wrote that; in 2010, EC7 became the Reference Design Code for geotechnical design within the European Union. These authors reported also that, applications of EC7 rules in "ground engineering" projects which include rock engineering subjects have difficulties. Therefore, reviewing of EC7 procedures had progressed starting from 2011 to finish in 2020, [4]. Researching to understand ground behaviours around underground spaces have supplied suggestions for related engineers to evaluate their decision. For example, Rahimi, et al. [17] wrote that deep mining operations had special attention required for their stability. They said that *"The main challenges at great depth are high rock stress levels, seismic events, large-scale deformation, sudden failures and high temperatures that may cause abrupt and unpredictable instability and collapse over a large scale"*. Therefore, they presented support design through "strategic, tactical, and operational" design stages. Similar research on the bases of different evaluations (conceptual, analytical, theoretical, observational, etc.) can be followed for shallow and deep underground space stabilities.

Earth crust can be different in characters around or under the engineered spaces. It can be deposited sediments (soil types) or rock formations. Dimensions and shapes of engineered spaces in earth crust or foundations on ground surfaces could be different according to offered projects' purposes. However, the "primary" objectives of the projects certainly cannot be changed; they should be stable, safe, socially and environmentally approved. In this subject, paper presented by Uotinen et al. [18] can be forwarded here. They wrote that, *"In Finland (and Sweden and Norway), there is no formal procedure on how to design rock spaces. The design is based on a designer's expertise, experience, views, and specific procedures"*. They also mentioned their concerns about differential design outcomes for "identical initial data". According to them; *"The Eurocodes do not explicitly state how to design rock spaces, but they define the minimum requirements on how to design structures"*. These researchers evaluated that; description of tunnels in FISE, *"Qualification of Professionals in Building, HVAC and Real Estate Sector in Finland"*, has more practical interpretation compared to EC7 covers. Therefore, they preferred to suggest FISE tunnel classification. According to them *"The clarifying note given in EC7 is unreasonably restrictive for geotechnical classification purposes"*.

Similarly, Buyukkagnici and Isik, [19], compared the outcomes of Turkish Standard-TS8853; British Standard-BS8006 and EC7 by considering slope stability conditions. They worked by handling limit

equilibrium and finite element methods. Their works presented that outcomes could have diversity among the applications of different standards. Applications and real-world experiences in rock engineering field have gradually produced additional experiences as well. Thus, revisions of EC7 have seemed to be on going procedure to keep good practices applicable.

6. CONCLUSIONS

Engineering applications related with earth crust require excavations in soil and rock formations. Different types of surface and underground excavations could possibly be realised through diverse engineering designs due to their specific requirements. Primary targets in these engineering plans is always obtaining safe and stable structures, constructions. Therefore, workers, foreman, engineers, experts dealing different concepts of earth crust in case of data collecting, evaluating, analysing, modelling, designing, back testing and analysing, rock blasting, excavating, supporting etc. have to be adequate in their professions. Required education levels (definitions) for engineers have stated in FEANI for EUR-ING titles for its members. Works and projects required for modern urban life have gradually located in deeper in earth crust. New underground space requirements have been accelerated with new metro lines, rock caverns, underground storages, roads, parks, shopping & sport centres, and other urban facilities. Therefore, engineers adequate to handle risk based design procedures should also be experienced in surface and underground engineering activities in different rock and soil mass conditions. Engineering decisions have been taken through ground engineering projects influence stabilities of engineered structures in/on earth crust. Standardisation efforts progressed in European Union include ground engineering subjects in EC7 procedures. EC7 has brought modified new attitudes for engineers to deal with their projected works' stabilities in/on earth crust. Engineers with rock engineering experiences (certificated) in rock cutting, mining, tunnelling, rock slope excavation, rock supports etc. might also be in service in EC7 applications. Lamas et al. [13] presented deliberate features of EC7, for example, in rock engineering designs in their study and, they pointed that, rock mass related; discontinuities, classes, matrixes, anisotropies, failure modes, strength considerations are the ones in several other factors to be considered carefully to supply related ground engineering decisions cases. As the results have gradually supplied through research studies which have been performed to observe suitability and effectiveness of EC7, its comparisons with national standards will also be involved progressively like given by Buyukkagnici & Isik [19] and Uotinen et al. [18]. Thus, revision steps which will be expected, in future, in EC7 should then include improvements according to on-going engineering researches and experiences. Engineering branches which have concentrated different aspects of works in/on earth crust have wide ranges of knowledge and experiences for ground engineering including in EC7 applications. Combination efforts of them have increasingly provided new dimensions and research areas for the stability concerns of engineered structures in/on earth crust.

Declaration of Ethical Standards

In this paper, all ethical guidelines including authorship, citation, data reporting, and publishing original research are followed by the author.

Funding / Acknowledgements

In this paper, no funding or research grants (and their source) received in the course of study, research or assembly of the manuscript were used.

Data Availability

In this paper, no research data available in a data repository were used.

REFERENCES

- [1] L.R. Alejano, A. Bedi, A. Bond, A.M. Ferrero, J.P. Harrison, L. Lamas, M.R. Migliazza, R. Olsson, A. Perucho, A. Sofianos, et al., "Rock engineering design and the evolution of Eurocode 7". Proceedings of the ISRM International Symposium, EUROCK, Wroclaw, Poland, 23–26th Oct. 2013; CRC Press, pp. 777–782.
- [2] F. Vagnon, S. Bonetto, A.M. Ferrero, J.P. Harrison, and G. Umili, "Eurocode 7 and rock engineering design: The case of rockfall protection barriers", *Geosciences*, vol. 10, pp. 305-320, 2020.
- [3] EN 1997-1 (English): "Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules", [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
- [4] J.P. Harrison, L. Alejano, A. Bedi, A.M. Ferrero, L. Lamas, J.F. Mathier, R. Migliazza, R. Olsson, A. Perucho, A. Sofianos, et al., "Rock engineering design and the evolution of Eurocode 7: The critical six years to 2020". Proceedings of the 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, Montreal, QC, Canada, 10–13th May 2015.
- [5] M.D. Bolton, "Eurocodes and the geotechnical engineering", *Ground Engineering*, pp. 17-21, April 1983.
- [6] FEANI-2000. "Guide to the FEANI register, EUR-ING", 3rd edition, Brussels, October 2000, Last update: Approved by the General Assembly on 6th October 2000. Revision of terminology on 23th August 2005 by the EMC of 15th July 2005.
- [7] FEANI-2013. "Guide to the FEANI EUR-ING register, (Eur-Ing Guide)", Last update: Approved by the General Assembly on 4th Oct. 2013.
- [8] M. Jovanovski, J.B. Papic, and I. Pesevski, "Educational level and qualification requirements in Eurocode 7: 202X", International Scientific Conference Earthquake Engineering and Geotechnical Aspects of Civil Engineering, 3-5th Nov. 2021, (Proceedings Ed.: R. Folic), pp. 492-502, 2021.
- [9] H. Bock, E. Broch, R. Chartres, M. Gambin, J. Maertens, L. Maertens, D. Norbury, P. Pinto, W. Schubert, and H. Stille, "The joint European working group of the ISSMGE, ISRM and IAEG for the definition of professional tasks, responsibilities and co-operation in ground engineering", in *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*, R. Hack, R. Azzam, and R. Charlier, Eds., pp. 1–8, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [10] F. Buggy, K. Thuro, G. Franzen, and M. Freitas, "Registration of ground engineering professionals-A European perspective", in *IAEG/AEG Annual meeting proceedings*, A. Shakoor, and K. Cato, Eds., San Francisco, California, vol. 6, 2018,
- [11] H. Bock, M. Herten, R. Schwerter, and K. Thuro, 2014. "Unified qualification requirements for ground engineering and engineering geology professionals", in *Engineering Geology for Society and Territory*, 7, G. Lollino, et al. Eds., pp. 207-211, 2014.
- [12] DGGT, "EASV Sachverständige für Geotechnik: Anforderungen an Sachkunde und Erfahrung, (EASV Experts for Geotechnical Engineering: requirements with regard to expertise and professional experience)", *Geotechnik*, Berlin, (Ernst & Sohn), vol. 36, pp. 51-57, 2013.
- [13] L. Lamas, A. Perucho, and L. Alejano, "Some key issues regarding application of Eurocode 7 to rock engineering design", Rock engineering and rock mechanics: Structures in and on rock masses, Proceedings of EUROCK2014, ISRM Regional Symposium, Vigo, Spain, May 2014.
- [14] O. Koc, "Strategies for design of support measures in tunnelling on basis of Eurocode", The 3rd Int. Symp. on underground excavations for transportation, pp.437-441, Istanbul, 29-30th Nov. 2013.
- [15] R. Olsson and A. Palmström, "Critical review of EC7 concerning prescriptive measures for rock mechanics design", Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, Proceedings of EUROCK2014, ISRM Regional Symposium, Vigo, Spain, pp. 1493-1498, May 2014.
- [16] F. Buggy and G. Franzén, "Registration of Ground Engineering Professionals-A European Perspective", Titre du document en Français, Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, Geotechnical Engineering foundation of the future, ECSMGE-2019-0818.
- [17] B. Rahimi, M. Sharifzadeh, and X.T. Feng, "Ground behaviour analysis, support system design and construction strategies in deep hard rock mining - Justified in Western Australian's mines",

- Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 12, pp. 1-20, 2020.
- [18] L. Uotinen, G. Nuijten, T. Siren, J. Stöm, M. Hakala, and M. Rinne, "Eurocodes in Hard Rock Engineering in Finland". ITA-AITES World Tunnel Congress, Finnish Tunnelling Association MTR, pp. 126-127, Helsinki, Finland, 20-26th May 2011.
- [19] Z. Buyukkagnici and N.S. Isik, "Comparison of success ratio calculated limit equilibrium methods for slope stability analyses, Eurocode 7 and BS8006 standards", *TÜBAV Bilim Journal*, Turkish Science Research Foundation, vol. 12, no. 2, pp. 18-29, 2019.



COMPUTER VISION IN PRECISION AGRICULTURE FOR WEED CONTROL: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

^{1*}Damla KARAGOZLU , ²John Karima MACHARIA , ^{1,3}Tolgay KARANFILLER 

¹ Cyprus International University, Department of Management Information Systems, 99258, Nicosia, TRNC

² Near East University, Department of Computer Information Systems, Near East Boulevard, 99138, Nicosia, TRNC

^{1*} dkaragozlu@ciu.edu.tr, ² 20206815@std.neu.edu.tr, ³ tkaranfiller@ciu.edu.tr

Highlights

- Identify popular computer vision approaches for weed control
- Determine which approaches worked best in which situations
- Approaches that were combined with Machine Learning were preferred



COMPUTER VISION IN PRECISION AGRICULTURE FOR WEED CONTROL: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

^{1*} Damla KARAGOZLU , ² John Karima MACHARIA , ^{1,3} Tolgay KARANFILLER 

¹ Cyprus International University, Department of Management Information Systems, 99258, Nicosia, TRNC

² Near East University, Department of Computer Information Systems, Near East Boulevard, 99138, Nicosia, TRNC

^{1*} dkaragozlu@ciu.edu.tr, ² 20206815@std.neu.edu.tr, ³ tkaranfiller@ciu.edu.tr

(Received: 04.04.2022; Accepted in Revised Form: 20.01.2023)

ABSTRACT: The paper aims to carry out a systematic literature review to determine what computer vision techniques are prevalent in the field of precision agriculture, specifically for weed control. The review also noted what situations the techniques were best suited to and compared their various efficacy rates. The review covered a period between the years 2011 to 2022. The study findings indicate that computer vision in conjunction with machine learning and particularly Convolutional Neural Networks were the preferred options for most researchers. The techniques were generally applicable to all situations farmers may face themselves with a few exceptions, and they showed high efficacy rates across the board when it came to weed detection and control.

Keywords: Computer Vision, Machine Vision, Precision Agriculture, Smart Farming, Weed Control

1. INTRODUCTION

The agricultural sector grapples with the dual tasks of maintaining a high crop yield from farms and doing so in a sustainable way, such that resources are utilized efficiently for costs and environmental friendliness [1]. Weeds refer to plants that are invasive in some way and are unwanted in a particular situation. The unmitigated proliferation of weeds in a farm setting can have a severe negative impact on crop yields, resulting in diminished yields, poorly utilized resources, and environmental degradation, particularly with respect to herbicides and farmer labour efforts. Traditional measures currently employed when dealing with weeds include the blanket use of herbicides over large tracts of farmland, which while effective to some extent, may also harm biodiversity in the region and cause environmental pollution in the process of weed removal. Steps thus need to be taken to ensure that only the unwanted weeds are removed from the main crop population, with minimal detrimental effects on the environment.

Advances in research and the fusion of technology and agriculture have resulted in precision agriculture, which is a boon to farmers worldwide. Precision agriculture consists of agricultural methods that utilize advanced sensors, software, and cameras for data collection and analysis, with the goal of higher yields, higher profits, and more sustainable land use [2]. Computer vision, which seeks to imitate the human eye's act of perceiving and understanding the world, features several implementations for the task of precision agriculture [3] These include; the use of computer vision and deep learning to locally detect pockets of weeds and subsequent removal through chemical, mechanical or electrical systems [1]; the use of robotics and computer vision to automatically wipe out the weeds with minimal human intervention [2]; ground-level mapping and subsequent navigational techniques of farms for monitoring crop health and identification of weeds through computer vision [4]; and even the use of a "farm-copter", that is, a quad-copter with cameras that flies over farmland and captures images of crops, which are then analyzed and relevant data provided to

*Corresponding Author: Damla KARAGOZLU, dkaragozlu@ciu.edu.tr

the farmer, allowing them to take actions to combat against weeds and pests [5].

The aforementioned techniques are all excellent applications of computer vision in conjunction with precision agriculture to the problem of weed control. However, there still exists a gap in research, particularly in how disparate the various methods that are currently being employed are. This paper sought to identify and catalog the relevant studies, critically analyze them and thus provide a detailed review of past research on the topic. This will enable future researchers and farmers to identify what techniques already exist, their different levels of success and feasibility, and which techniques work best for their particular unique situations. To meet this objective, the following research questions were asked;

- 1-What are the different computer vision techniques currently being used for weed control?
- 2-In which situations do computer vision techniques give the most accurate results?
- 3-What is the efficacy of the different techniques being used?

2. MATERIAL AND METHOD

The study implemented a systematic literature review (SLR) to identify and select relevant articles while minimizing the chance of possible bias during the review process [6].

2.1. Search Strategy

The systematic literature review began with a search for the selected keywords that were relevant to the subject matter of the study. The keywords employed were “Computer Vision” AND “Precision Agriculture” AND “Weed Control” coupled with the synonyms listed in the following table. These keywords were then used to search through high-quality databases, namely Scopus, IEEE, and ScienceDirect, between a period of eleven years, from 2011 to 2022. These three journals were selected as they covered the fields of Agricultural and Biological Sciences and Computer Science, making them ideal sources of journals for this particular literature review.

Table 1. Keywords search query

	Keyword	Synonyms
MAIN	“Computer Vision”	“Machine Vision” OR “Vision”
AND	“Precision Agriculture”	“Precision Farming” OR “Smart Farming”
AND	“Weed Control”	“Weed Management”

2.2. Inclusion and Exclusion Criteria

The study used inclusion and exclusion criteria as part of the selection process to obtain articles that were relevant to the researchers’ aims. The inclusion criteria stipulated that only research articles published in the English language and that were fully accessible in the aforementioned databases, were to be chosen. The records that did not meet these conditions were excluded from the review.

Table 2. Inclusion and Exclusion Criteria

Inclusion Criteria	Exclusion Criteria
Research articles published in the English language	Papers that were not written in the English language
Documents published within the last eleven years from 2011 to 2022	Duplicated papers
Full text papers that are accessible and downloadable	Full text of the document is not accessible on the internet
Available within the selected databases	The study aim is not clearly defined
Studies that focused on Computer Vision, Precision Agriculture, and Weed Control	Relevant studies, but either Computer Vision, Precision Agriculture, or Weed Control are not the main objects of impact
Studies that considered Computer Vision, Precision Agriculture, and Weed Control as the main objects of impact	Conference Papers, editorial materials, and literature reviews

2.3. Selection Criteria

The PRISMA diagram was used to screen records for the primary study selection process that fall into the aforementioned parameters. The acronym PRISMA stands for, “Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses” [6]. It allowed the researchers to exclude papers duplicated between the databases. It also allowed the researchers to exclude studies without clearly defined aims, studies that are not relevant to the research questions, and studies that only focused on one keyword as opposed to all of them, i.e., computer vision, precision agriculture, and weed control.

A total of one thousand and thirty (n=1030) articles were retrieved from a preliminary search of the three databases, with the individual databases contributing records as follows: Scopus (n=398), IEEE (n=101), and ScienceDirect (n=531). Out of these results, records whose full text was not accessible on the Internet totaled four hundred and fifty (n=450). Papers other than research articles were also removed, and these totaled four hundred and twenty-four (n=424) Papers not in the English language totaled nine (n=9), and these were removed in the process as well.

Up next was a check for duplicates, which identified five (n=5) sets of duplicates among the articles. Upon merging them, the new total number of articles came down to 142 research articles. Thus, a hundred and forty-two articles (n=142) were left to be assessed for eligibility. The remaining articles were then examined against the research questions to ensure that they could provide some insight into them and subsequently the theme of the paper. After applying the aforementioned criteria, a total of thirty-five (n=35) articles remained as primary studies for review. These excluded articles whose study aim was not clearly defined and articles that were relevant but did not focus on computer vision, precision agriculture, and weed control.

2.4. Data Extraction

Data extraction was carried out on the remaining articles that met the selection criteria. This was conducted following the parameters shown in the table below.

Table 3. Data Extraction Form

Data Item	Description
Author, Citations, Location, Year	Give the author names, citation count, publication location, and year of publication
Theory considered	Which theory/area of expertise was considered in the study
Purpose of the study	The main aim of the study
Research design	What research design was utilized
Key findings	Show the main results from the articles
Challenges	What limitations were faced in the research process

2.5. Data Analysis

After the data was collected and extracted from the articles, it was synthesized through the construction of a summary table and subsequently evaluated along methodological and theoretical aspects based on the utilization of computer vision in precision agriculture for weed control. This was carried out to answer the established research questions.

3. RESULTS

3.1. Computer Vision Techniques for Weed Control

Several computer vision techniques were utilized in the studies with the aim of weed control. Studies primarily focused on accurately distinguishing between crops and weeds from image analysis through semantic segmentation, which then allowed the farmers to combat the infestation with precision as opposed to conventional blanket herbicide applications [7, 8, 9, 10, 11]. A few studies focused on real-time detection technology of weeds, with some employing sensor technology coupled with computer vision to detect weeds, analyze soil fertility, and alert on fires in the field [12, 13, 14, 15]. Some studies also focused on holistic systems for weed control, providing the mechanisms for weed detection and subsequent targeting via herbicides all in one solution e.g., through a smart sprayer or automated mechanical weed remover solutions [13, 16, 17]. Some studies also utilized 3D approaches and geometric analysis in their machine vision experiments in an attempt to produce better detection algorithms [18, 19, 20, 21].

A large number of studies implemented machine vision techniques in conjunction with some machine learning technologies. These included deep neural networks, convolutional neural networks, supervised and semi-supervised learning, Support Vector Machines, Random Forest classification, and K-nearest neighbors' classification. Of note is a study that used fuzzy logic and children's guesses as a starting point in building their system as opposed to training neural networks [22]. This method yielded insightfully positive results, outperforming more conventionally trained, neural-network-backed computer vision techniques.

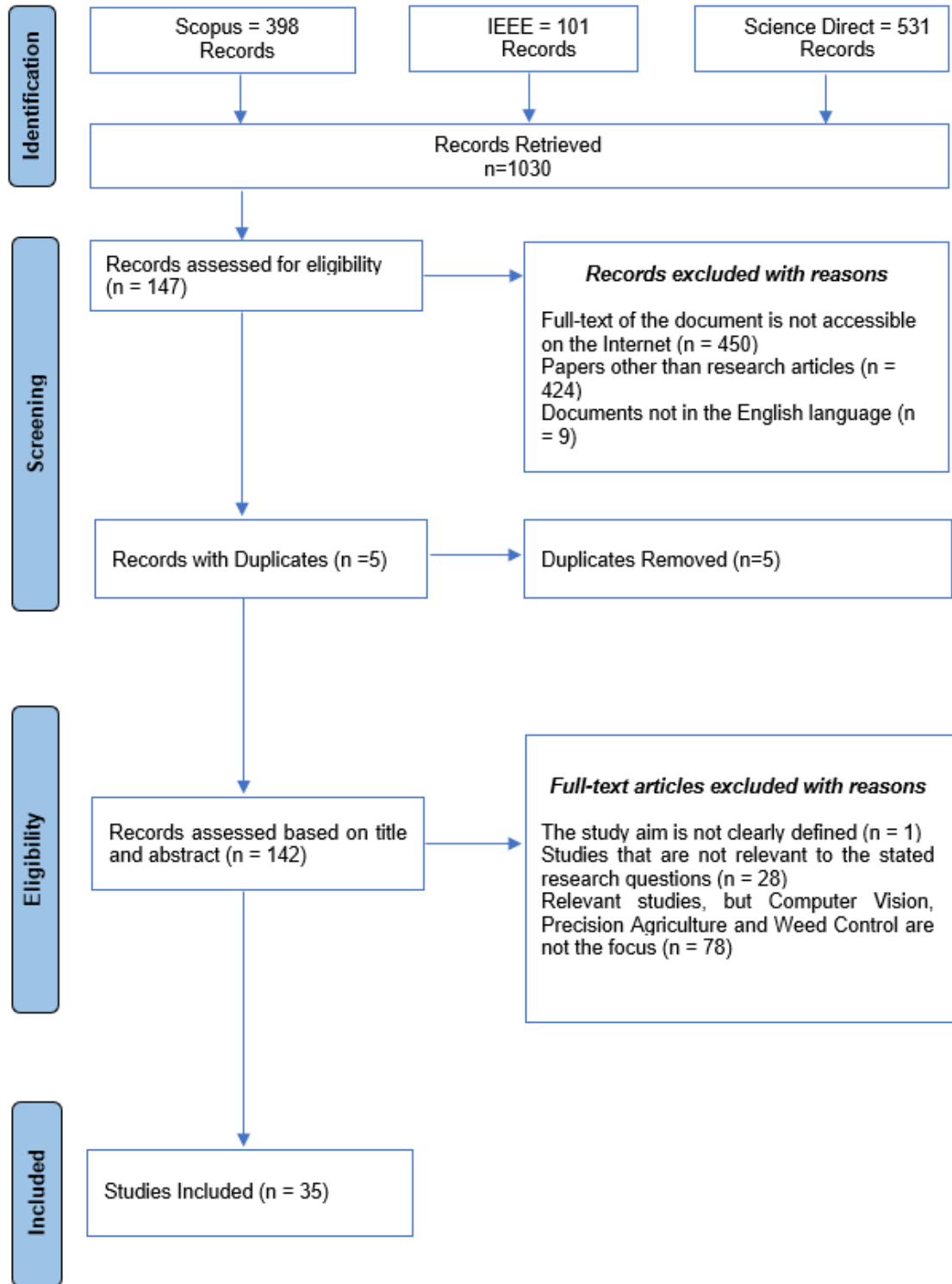


Figure 1. PRISMA Flow Diagram for the selection process

3.2. Computer Vision Techniques and the Conditions They are Most Successful

The aforementioned methods were all found to be high in efficacy, except for end-to-end or fully autonomous solutions. The rest of the methods required relatively little capital to implement and were accessible to most farmers in the know of their existence. However, the autonomous and vehicular solutions needed an infusion of capital to implement and this may be out of the reach of farmers who are not too well off, such as smallholders and those in third-world countries [13, 23, 24, 25].

As for the knowledge backing needed, implementation of computer vision with the aim of weed control primarily required some background knowledge of what machine vision architecture one was going to implement and the machine learning method to be used.

3.3. Efficacy Rates of the Different Computer Vision Techniques Being Used for Weed Control

All the methods showed exceptional results in aspects such as accuracy and sensitivity. A convolutional neural network implementation within computer vision was the most prevalent iteration of a robust precision agriculture system, and coincidentally also made up the most accurate system, with an accuracy rate of 99.19% when it came to crop and weed detection. Most models were able to achieve accuracy rates of 90% and upwards, with the lowest-scoring one coming in at 59.8% [15, 24].

4. DISCUSSION

The review worked to analyze the various computer vision techniques utilized in precision agriculture for weed control. Most of these implemented a facet of machine learning, be it Support Vector Machines, Back Propagation, or Convolutional Neural Networks. These AI tools were then used in the machine vision systems to create models that accurately detected weeds, pests, and diseases in crops.

The results show that generally, computer vision is primarily employed in image analysis as opposed to the less common application within real-time autonomous weed detection and control systems. Farmers and researchers alike use computer vision as a first step in mitigating weed population, then once they can get a working model and identify the problem areas, additional weed control efforts are sought. Prevention and early detection are preferred to fighting full-blown infestations, and as such, the farmers' and researchers' methodologies have merit in that regard.

Another point of note is that autonomous systems are relatively expensive to build and utilize. Retrofitting tractors with expensive cameras, building smart sprayers and use of autonomous vehicles represent significant investments that are not to be taken lightly and thus may be out of the range of quite a few researchers and farmers.

New techniques are being explored in research in addition to machine learning implementations, and these involve Masks' Law, Clifford Algebra, 3D techniques, and even the use of children's minds in conjunction with fuzzy logic. These methods are arguably faster to implement, as all the aforementioned machine learning models need to undergo some aspect of training. They are also more cost-effective as they typically do not require as much computing power as machine learning systems to conduct vision analysis.

While techniques deployed singularly on their own are adept at weed control, it is the synergy brought about by the combination of two or more techniques that brings the greatest payoff to researchers and farmers alike in precision agriculture. The confluence of fluorescent imaging, crop signaling, and 3D localization algorithms yielded significant payoffs while offering a unique method of weed detection and control to researchers in one case. In another case, wireless sensor networks together with machine learning implementations of Support Vector Machines and Random Forest were able to accurately monitor for pest and weeds and was also affordable to set up. Simple systems involving Convolutional Neural Networks and

smartphones were used to detect corn leaf disease in real time, functioning even when the software was not connected to the internet. In these cases, synergistic approaches to precision agriculture represented attainable end-to-end real-world applications of computer vision in the task of weed control.

Table 4. General Description of The Studies

Ref #	Author/Number of Citation(s) (C)/Location (L)	GfE/Theory considered	Purpose of the study	Research design	Key finding (s)	Challenges
4.	(Zhao et al., 2021) C=5 L=USA	Transfer learning, deep learning	Create a pipeline to improve object detection using deep learning, with applications in precision agriculture.	Experimental study	The new object detection method resulted in a smaller need for manual-labeling tasks, saving time and effort. It also showed improvements in object detection after training from augmented datasets, can scale to other crops, and work as an effective weed combating measure.	The study should have employed more real images from which to build synthetic images for the training of the pipeline.
7.	(You et al., 2020) C=8 L=South Korea	Deep Neural Network (DNN) Based segmentation model for crop/weed recognition, coupled with a convolutional layer (CNN) and DropBlock	Improve on semantic segmentation (pixel-wise classification) networks for weed/crop identification	Experimental study	While previous studies only used DNN alone for segmentation, the introduction of a CNN and DropBlock improves the model's performance by 4.65% and 1% respectively.	The model having to contend with various lighting conditions and image capture angles from the camera, which was overcome by the use of a CNN.

8.	(Asad & Bais, 2020) C=20 L=Canada	Deep learning, semantic segmentation, Maximum Likelihood Classification (MLC)	Propose a two-step approach for manually labeling weeds in agricultural images and use of semantic segmentation for the detection and mapping of weeds. These are coupled with iterations over different feature extractors and meta-architectures.	Quantitative study	The two-step approach for manually labeling images saves time, reduces errors, and increases labeling efficiency. Semantic segmentation was promising for weed detection, with a Mean Intersection Over Union (MIOU) value of 0.8288 and Frequency Weighted Intersection Over Union value of 0.9869. SegNet was found to be the better meta-architecture and ResNet-50 feature extractor was found to have better performance over VGG16.	The study did not include soil samples which would have shed even more light between soil characteristics and weed densities.
9.	(Sodjinou et al., 2022) C=5 L=Benin	Semantic segmentation, K-means algorithms	Segment between crops and weeds in images where a complex presence of weeds exists through semantic segmentation and K-means algorithm.	Experimental study	Accurate segmentation of crops and weeds was achieved where images had a complex presence of weeds and attained a maximum accuracy of 99.19% with their method.	Image quality decreased once semantic segmentation was implemented to detect weeds. This may be dealt with in the future through quality enhancement.
10.	(Wang et al., 2020) C=12 L=China	Semantic segmentation, deep learning	Carry out pixel-wise semantic segmentation via an encoder-decoder deep learning network.	Experimental study	The deep learning network applied did not require a lot of training data. Near Infrared Information (NIR) improved segmentation accuracy of the process, compensating for poor illumination conditions in the system.	The model is bulky as is, and cannot be deployed to more portable systems such as mobile devices without first subjecting it to compression.

11.	(Zhang et al., 2022) C=3 L=USA	Support Vector Machines (SVM), Visual Group Geometry 16 (VGG16)	Identify and classify crops and weeds through RGB image texture features and contrast between ML and DL methods	Experimental study	Deep Learning performed better than machine learning efforts to detect weeds and crops, with VGG16 classifiers beating out SVM classifiers with scores of over 93%.	The study was limited to only a few species of weeds and crops found in the midwestern region of USA.
12.	(Bhanu et al., 2019) C=11 L=India	Multi-agent-based context-aware information gathering, Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSN).	Develop a system of sensor networks coupled with context-aware systems and agent technology for monitoring agriculture i.e., to detect weeds, fire, diseases, and soil fertility.	Simulation	The proposed system performed better than the previous Context Aware Wireless Irrigation Systems (CAWIS) in terms of context detection time, energy consumption, delay, and fusion time.	The increase in the number of nodes caused communication delays, increases in energy use, context detection time, and fusion time. The introduction of more sink nodes is recommended for future research.
13.	(Partel et al., 2019) C=91 L=USA	Neural Networks to aid in target detection and classification, deep learning, transfer learning, Convolutional Neural Networks.	To build a low-cost, smart sprayer that allows for the precision targeting and management of pests and weeds.	Experimental study	A low-cost system (\$1500) was built for precision targeting and spraying of weeds which when coupled with AI, was able to achieve a precision rate of 71% and a recall rate of 78% on real plants.	Price of Graphics Processing Units; the more expensive ones yielded better results. The sprayer performed slightly worse in shadowless areas and experienced a majority of misses on its right side for inconclusive reasons.
14.	(Kamath et al., 2019) C=23 L=India	Wireless sensor network applications, Raspberry Pi, Random Forest, Support Vector Machines	Develop a wireless sensor network system using Raspberry Pis to monitor paddy crops for weeds and carry out their targeted elimination.	Experimental study	A wireless sensor network was successfully developed and implemented. It was low-cost and was able to watch the crops for pests and weeds.	The sensor network could be expanded with more functionality, such as soil analysis, humidity sensing, and illumination analysis.
15.	(Cubero et al., 2020) C=8 L=Spain	Robotics, remote sensing	Create a remote-controlled field robot for detecting maladies and pests in crops via remote sensing techniques.	Experimental study	A remote-controlled robot that can detect maladies and pests with accuracies of up to 67.3% in the lab and 59.8% in the field was developed.	The system relies on remote piloting, which may be labor-intensive, as opposed to a completely autonomous system.

16.	(Dimililer & Kiani, 2017) C=11 L=North Cyprus	Back propagation neural network (BPNN), robotics	Create a framework from neural network algorithms that enables farmers to conduct real-time maize plant detection and simplify their in-row weeding efforts.	Experimental approach	The BPNN implemented was accurate 88% of the time. The entire system was flexible, fast, and robust, with the BPNN able to finalize its training after 2213 iterations within 82 seconds.	The image datasets used for the training and testing of the BPNN could have been more expansive, as the study only used 30 images for the training set and 50 images for the generalization set.
17.	(Albanese et al., 2021) C=1 L=Italy	Artificial intelligence, machine learning (ML), smart cameras, deep neural networks (DNN)	Present a smart trap that autonomously identifies and captures pests and alerts the farmer of their location for pesticide application	Quantitative study	The system used ML algorithms to identify pests captured in the traps and provide an early warning system for farmers. ML analysis occurs on board the smart trap, thus bandwidth costs for wireless transmission of images are reduced. An energy harvester for the trap was also implemented.	The limited energy of the smart traps, which the researchers attempted to mitigate via an energy harvesting mechanism installed alongside the trap.
18.	(Smith et al., 2018) C=11 L=UK	3D crop analysis, photometric stereo	Develop a 3D approach to computer vision that overcomes the current 2D approach's limitations i.e., perspective, occlusion, changes in background light, and parallax.	Experimental approach	The 3D system was able to accurately determine plant textures with high resolutions even under direct sunlight. It also measured the size of produce in the field to an accuracy of within 10% under a range of environmental conditions.	Real-world conditions for testing the 3D imaging system were hampered as the tractor which held the system had issues related to power supply.
19.	(Khan et al., 2019) C=14 L=China	Clifford geometric algebra, unmanned aerial vehicles (UAVs)	Implement Clifford geometric algebra in tandem with the use of UAVs to get authentic color space image processing and better carry out precision agriculture.	Experimental study	The use of Clifford algebra (CA) yields genuine color space image processing over the typical RGB segmentation approaches. Edge detection may be carried out using CA and it can be used to detect and measure plant variability and soil changes.	More studies implementing Clifford Analysis in segmentation need to be carried out concerning precision agriculture.

20.	(Del-Campo-Sanchez et al., 2019) C=12 L=Spain	Artificial neural networks, geometry	To determine the impact that the <i>Jacobiasca lybica</i> pest has on vineyards through artificial neural network techniques and geometric techniques.	Experimental study	The use of machine vision and geometric techniques was able to improve results during pest detection.	Soil and affected vegetation in a 2D space suffer from similar radiometric responses, which can be a source of error.
21.	(Su et al., 2022) C=2 L=China	Fluorescent imaging, crop signaling, 3D localization algorithm	Develop a method of distinguishing between soybean crops and weeds through crop signaling and computer vision algorithms	Experimental study	Soybean plants were identified from weeds through crop signaling, through seeds being treated with an Rh-B marker, and 3D imaging as the marker gave off unique optical characteristics.	The study may have benefitted from coupling the 3D imaging system with actual weed removal mechanisms and tested it as such.
22.	(Kiani et al., 2017) C=1 L=North Cyprus	Children, Early-age child recognition, Fuzzy logic.	Build an automated system for mechanically pulling out weeds, starting first by using actual human children to make guesses as to what plant is a weed and later honing this systematic analysis with fuzzy logic	Quantitative study	An Application Programming Interface (API) that emulated the human brain and did not rely upon neural networks was built. The API is implemented on low-cost platforms and its use resulted in a 95% accuracy rate which slightly outperforms typical neural network-based classifiers.	The experiment was only carried out under extreme July sun lighting conditions and does therefore not account for overcast weather.
23.	(Shorewala et al., 2021) C=2 L=India	Deep Learning-based Semi-Supervised Approach for robust approximation of weed density from images captured by autonomous robots. Convolutional Neural Networks (CNN) also used.	Develop an economically feasible way for analyzing farm images, and seek an alternative to the resource-intensive supervised ML approaches that need huge amounts of manually annotated images to train.	Quantitative study	Proposed approach detected weeds from the images provided with a maximum recall of 0.99 and an accuracy of 82.13%. The study reduced reliance on manually annotated images as it employed semi-supervised learning.	Several iterations are necessary to come up with vegetative masks for the model, which is time-consuming.

24.	(Dankhara et al., 2019) C=5 L=India	Autonomous robots, IoT, Supervised Learning.	To propose an architecture for the use of IoT in smartweed detection and precision agriculture.	Exploratory research	An IoT-based intelligent robot built from a Raspberry Pi, Sprayer, Pi Camera, and software components may increase the accuracy and precision of weed removal from the field. Reduction of herbicides present in the field would occur, reducing health problems arising from their use.	A shortage of good quality pixel-wise images reduces the accuracy of results.
25.	(Li et al., 2022) C=0 L=UK	Robotics, Lane Detection, Novel Image Processing Pipeline	Develop a new image processing pipeline to detect and follow narrow cereal crop rows with high fidelity. It is intended to be integrated with robotic applications.	Experimental study	Initial machine vision efforts were prioritized over later ML manipulations. The new method can pick out rows despite cases of significant occlusion, work on low-cost hardware, in real-time, and on high/low-resolution images.	The robotics aspect of the study may not hold up to drastic terrain shifts as it has only been tested on straight rows.
26.	(Patayon & Crisostomo, 2021) C=1 L=Philippines	Deep learning, neural networks.	Propose a system implemented through computer vision and artificial intelligence to detect abaca bunchy top disease.	Experimental study	For precision under the DSLR, performance of the model is better when images of leaves and petioles are used for training while performance of the model is better when images of petioles are used under mobile device image capture.	The study was limited by its dataset of training images and did not explore other architectures such as ResNet, AutoML, or GoogleNet.
27.	(Liu & Chahl, 2021) C=0 L=Australia	Deep Neural Networks (DNN), Convolutional Neural Networks (CNN)	Create a machine vision system capable of detecting invertebrates on crops in the field for precision application of pesticides.	Quantitative study	The system aided early detection of invertebrates on the crops. A novel virtual ML model training database was also created. The study found that ResNet performed better than AlexNet and VGG for pest classification.	Limited training data for the CNN which the researchers mitigated through the use of a virtual database.

28.	(Partel et al., 2021) C=0 L=USA	Machine vision, artificial intelligence, sensor systems, Convolutional Neural Networks (CNN)	Develop a real-time smart sprayer sensing system capable of classifying tree leaf health, and tree leaf density, can adapt to environmental changes, and can also pick out trees from other objects.	Experimental study	The system cost \$2000 to develop and was able to estimate tree height with low average error of 6%. It also classified trees based on whether they were young, mature, old, dead, or if they were not trees with a success rate of 84%. It also better-targeted weeds for spraying, reducing spraying volume by 28% in contrast to conventional spraying (where the nozzle is always open).	The cameras on the smart sprayer system are susceptible to dust, sunlight, and water. The smaller field of view may also be a limitation for the cameras.
29.	(Hu et al., 2021) C=2 L=USA	Convolutional Neural Networks (CNN)	Determine effects of illumination consistency and picture quality on the performance of convolutional neural networks.	Simulation study	Using more variability in image illumination for training purposes may mitigate the dip in performance of the CNN brought about by real-world illumination variability, but it does not match up to the benefit that is brought to the CNN's performance by using images from similar lighting conditions.	The simulation of image degradation contained images that still possessed some level of blur and noise and thus the best convolutional neural network performance that is feasible remains unknown.
30.	(Kamath et al., 2020) C=7 L=India	Laws' Masks based texture classification, Random Forest Classification.	Propose a different approach to weed identification from images by use of Laws' masks, which is primarily utilized in healthcare but may be adapted for agricultural purposes.	Experimental study	Laws' masks classification was able to extract a total of 70 features from the images, and subsequently use these to train the Random Forest Classifier to detect weeds with an accuracy of 94%	Low number of publicly-available crop and weed benchmark datasets for researchers to use.

31.	(Le et al., 2020) C=7 L=Australia	Local binary patterns, contour masks, feature extraction, Support Vector Machines (SVM)	Develop a way of combining features extracted from local binary pattern operators and contour masks to increase the discrimination rate between broadleaf plants.	Quantitative study	The system reduced noise, improved plant classification accuracy, and exhibited peak performance at 98.63% in identifying morphologically similar plants. The system allowed for real-time detection and classification of plants.	The system may have further-reaching applications, not just those of identifying morphologically similar crops and weeds and other avenues should be explored.
32.	(Mishra et al., 2020) C=18 L=India	Deep learning, Convolutional Neural Network (CNN)	Develop a way through machine learning algorithms to recognize corn leaf disease in real-time.	Experimental approach	A deep CNN was designed and deployed that identified corn diseases in real-time with accuracies of up to 98.40% without the need for the Internet. The algorithm also identified corn diseases from images captured on smartphones with an accuracy of 88.66%.	The dataset was limited in terms of the number of maize diseases it included.
33.	(Varalakshmi & Aravindkumar, 2019) C=0 L=India	Support vector machines (SVM), Sobel detection, active contour	Develop an automated system for the detection and analysis of diseased leaves for the targeted application of pesticides.	Experimental study	The SVM approach was found to offer higher accuracy over other methods, having better sensitivity among the selected classifiers and overall performing better than them.	The method may be expanded to also give recommendations as to exactly what treatment is needed to tackle the plant disease, enriching the precision farming experience.
34.	(Singh et al., 2019) C=74 L=India	Multilayer Convolutional Neural Network (MCNN)	Create a way of effectively diagnosing mango leaves suffering from Anthracnose fungal disease through integrating deep learning and machine vision.	Experimental study	The model performed well, being able to detect anthracnose disease 97.13% of the time. The model developed was also simple and efficient in terms of computational power used.	Working with real-time data sets caused the study to encounter some inconsistencies in its experiments.

35.	(Pallottino et al., 2018) C=12 L=Switzerland	k-Nearest Neighbour (k-NN), shape analysis, machine vision.	Develop a system fitted onto tractors to allow real-time field operations and control tillage, aiding in precision agriculture, particularly weed control.	Experimental study	k-NN algorithm performed well under conditions of poor ambient lighting, which contrasted with the poor performance of the initial unsupervised algorithms.	At times, the tractor adversely cast two distinct lighting conditions on the crop rows, muddling the efficacy of the k-NN and machine vision system. The system was also not currently feasible at speeds greater than 1km/h ⁻¹ .
36.	(Bosilj et al., 2018) C=12 L=UK	Attribute morphology, segmentation, classification, Support Vector Machines	Develop a new method for image processing that relies on attribute morphology for segmentation and classification, as opposed to commonly used thresholding techniques.	Experimental study	The proposed approach can be used to segment the finer details of crop areas locally, can identify discriminating features, and classify plants as either weeds or crops at competitive rates.	The pipeline was not optimized to yield maximum speed, which is a limitation that can be tackled in later iterations.
37.	(Kiani & Mamedov, 2017) C=17 L=North Cyprus	Fuzzy analysis	Develop a method to identify plant disease through machine vision based on fuzzy logic and human brain approximations, without the need for neural networks or lengthy training of the system.	Experimental study	The study was able to develop a system free of neural networks that was accurate for detection and segmentation of crop maladies 97% of the time and took 1.2 seconds to compute the results.	Strong outdoor sun illumination hampered the identification of disease in some cases.
38.	(Montalvo, et al., 2012) C=127 L=Spain	Vision system atop an autonomous mobile agricultural vehicle, image segmentation, and double thresholding for crop row detection.	Develop an automatic method for crop row detection in maize fields with high weed pressure for precision targeting with herbicides.	Quantitative study	Initial thresholding recovers both weeds and crops, but upon the second thresholding, only crops are positively identified, even in areas with high weed pressure. This indicates that the addition of a second thresholding step is beneficial in areas with high weed densities.	Weeds and crops have similar Red, Green and Blue (RGB) spectral values and the vibrations from the vision system mounted on the vehicle impede image capture.

39.	(Burgos-Artizzu et al., 2011) C=194 L=Spain	Fast Image Processing (FIP) and Robust Crop Row Detection (RCRD)	Develop an accurate computer vision system comprising FIP and RCRD that is capable of functioning in the field in real-time and under uncontrolled lighting conditions for weed discrimination.	Quantitative study	The combination of the FIP and RCRD results in 85% detection of weeds and 69% of crops with videos subjected to blurriness/lighting changes and 95% detection of weeds and 80% of crops in fair videos.	The system was only tested on videos; thus, it remains to be seen if the accuracy statistics will hold up once tested in the field.
40.	(Tellaeché et al., 2011) C=102 L=Spain	Support Vector Machines (SVM), Machine Vision	Develop an automatic computer vision system capable of detecting <i>avena sterilis</i> which is a weed that grows among cereal crops.	Quantitative study	Since <i>avena sterilis</i> and cereal crops are similar in appearance, the new proposed approach is broken down into two stages, segmentation, which is first carried out using regular processing techniques, and decision-making, which is carried out by use of SVM.	The system may not be robust against lighting variability.

5. CONCLUSION

The field of precision agriculture is poised to be an abundant research area. This coupled with reducing costs of computer processors and cameras means that more researchers and independent practitioners will continue to experiment with various iterations of computer vision techniques with different implementations in precision agriculture for weed control. The interest of researchers in the last decade alone is promising, given the rising trend in publications on the subject matter. Machine learning plays a big part in computer vision techniques, with methods such as Convolutional Neural Networks, Support Vector Mechanisms, and k-nearest neighbour algorithms being utilized extensively. Unconventional methods such as the fusion of fuzzy logic and children's guesses or crop signaling via fluorescent imaging must not be disregarded as they offer their own speed and efficiency contributions to the area. Synergistic applications whereby several techniques are used in tandem offer the best chance of effective weed control and are worth pursuing as they pool together several strengths from disparate methods. Research on weed control has come a long way and current studies promise to reduce the labor efforts of farmers significantly, all at relatively inexpensive costs, and also increase crop profits and aid the environment in its recovery.

The systematic literature review was limited by the time period within which it bound itself, i.e., 2011 to 2022. It was also bound by the selection criteria used and the databases employed in the review process. Further studies may incorporate more databases and also seek out articles on the subject matter in different languages, not just those written in the English language.

Declaration of Ethical Standards

The authors prepared the study in accordance with all ethical guidelines.

Credit Authorship Contribution Statement

D.K., J.K. and T.K.: Conceptualization; D. K.: Resources, Review, Supervision, and Project Administration. J. K: Methodology, Investigation, Formal Analysis, Original Draft. T. K.: Format Adjustment

Declaration of Competing Interest

There is no conflict of interest with any institution or person within the scope of the study.

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

All data used in the study are available from the corresponding author upon reasonable request.

REFERENCES

- [1] L. C. Junior and J. Alfredo C. Ulson, "Real time weed detection using computer vision and Deep Learning," *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2021. doi:10.1109/induscon51756.2021.9529761
- [2] O. C. Ghergan, D. Drăghiescu, I. Iosim, and P. A. Necşa "The Role of Computer Vision in Sustainable Agriculture," 2021. *Agricultural Management / Lucrari Stiintifice Seria I, Management Agricol*, 23(2), 82-88.
- [3] M. Sonka, R. Boyle, and Vaclav Hlavac, *Image processing, analysis, and machine vision*. Andover] Cengage Learning, 2015.
- [4] W. Zhao, X. Wang, B. Qi, and T. Runge, "Ground-Level Mapping and Navigating for Agriculture Based on IoT and Computer Vision," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 221975–221985, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3043662>.
- [5] A. M. S, Anju Anu Jose, C Bhuvanendran, D. Thomas, and Deepa Elizabeth George, "Farm-Copter: Computer Vision Based Precision Agriculture," Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/icccsp49186.2020.9315239>.
- [6] B. Kitchenham, "Procedures for Performing Systematic Reviews, Version 1.0," *Empir. Softw. Eng.*, vol. 33, no. 2004, pp. 1–26, 2004, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Barbara-Kitchenham/publication/228756057_Procedures_for_Performing_Systematic_Reviews/links/618cfae961f09877207f8471/Procedures-for-Performing-Systematic-Reviews.pdf
- [7] J. You, W. Liu, and J. Lee, "A DNN-based semantic segmentation for detecting weed and crop," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 178, p. 105750, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105750>.

- [8] M. H. Asad and A. Bais, "Weed detection in canola fields using maximum likelihood classification and deep convolutional neural network," *Information Processing in Agriculture*, vol. 7, no. 4, pp. 535–545, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.12.002>.
- [9] S. G. Sodjinou, V. Mohammadi, A. T. Sanda Mahama, and P. Gouton, "A deep semantic segmentation-based algorithm to segment crops and weeds in agronomic color images," *Information Processing in Agriculture*, vol. 9, no. 3, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.08.003>.
- [10] A. Wang, Y. Xu, X. Wei, and B. Cui, "Semantic Segmentation of Crop and Weed using an Encoder-Decoder Network and Image Enhancement Method under Uncontrolled Outdoor Illumination," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 81724–81734, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2991354>.
- [11] S. G. c, Y. Zhang, C. Koparan, M. R. Ahmed, K. Howatt, and X. Sun, "Weed and crop species classification using computer vision and deep learning technologies in greenhouse conditions," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 9, p. 100325, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100325>.
- [12] K. N. Bhanu, T. B. Reddy, and M. Hanumanthappa, "Multi-agent based context aware information gathering for agriculture using Wireless Multimedia Sensor Networks," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 33–44, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2018.07.001>.
- [13] V. Partel, L. Costa, and Y. Ampatzidis, "Smart tree crop sprayer utilizing sensor fusion and artificial intelligence," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 191, p. 106556, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106556>.
- [14] R. Kamath, M. Balachandra, and S. Prabhu, "Raspberry Pi as Visual Sensor Nodes in Precision Agriculture: A Study," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 45110–45122, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2908846>.
- [15] S. Cubero, E. Marco-Noales, N. Aleixos, S. Barbé, and J. Blasco, "RobHortic: A Field Robot to Detect Pests and Diseases in Horticultural Crops by Proximal Sensing," *Agriculture*, vol. 10, no. 7, p. 276, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture10070276>.
- [16] K. Dimililer and E. Kiani, "Application of back propagation neural networks on maize plant detection," *Procedia Computer Science*, vol. 120, pp. 376–381, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.253>.
- [17] A. Albanese, M. Nardello, and D. Brunelli, "Automated Pest Detection With DNN on the Edge for Precision Agriculture," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 458–467, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/jetcas.2021.3101740>.
- [18] L. N. Smith, W. Zhang, M. F. Hansen, I. J. Hales, and M. L. Smith, "Innovative 3D and 2D machine vision methods for analysis of plants and crops in the field," *Computers in Industry*, vol. 97, pp. 122–131, May 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.002>.
- [19] P. W. Khan, G. Xu, M. A. Latif, K. Abbas, and A. Yasin, "UAV's Agricultural Image Segmentation Predicated by Clifford Geometric Algebra," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38442–38450, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2906033>.
- [20] A. del-Campo-Sanchez, R. Ballesteros, D. Hernandez-Lopez, J. F. Ortega, and M. A. Moreno, "Quantifying the effect of *Jacobiasca lybica* pest on vineyards with UAVs by combining geometric and computer vision techniques," *PLOS ONE*, vol. 14, no. 4, p. e0215521, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215521>.
- [21] W.-H. Su, Ji Sheng Ma, and Q. Huang, "Development of a Three-Dimensional Plant Localization Technique for Automatic Differentiation of Soybean from Intra-Row Weeds," *Agriculture*, vol. 12, no. 2, pp. 195–195, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020195>.
- [22] . E. Kiani, M. A. Shahadat, F. Sadikoglu, "Child perception-based plant species identification" *Procedia Computer Science*, vol 120, pp 357-364, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.250>

- [23] S. Shorewala, A. Ashfaq, R. Sidharth, and U. Verma, "Weed Density and Distribution Estimation for Precision Agriculture Using Semi-Supervised Learning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 27971–27986, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3057912>.
- [24] F. Dankhara, K. Patel, and N. Doshi, "Analysis of robust weed detection techniques based on the Internet of Things (IoT)," *Procedia Computer Science*, vol. 160, pp. 696–701, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.025>.
- [25] X. Li, R. Lloyd, S. Ward, J. Cox, S. Coutts, and C. Fox, "Robotic crop row tracking around weeds using cereal-specific features," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 197, p. 106941, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106941>.
- [26] U. B. Patayon and R. V. Crisostomo, "Automatic Identification of Abaca Bunchy Top Disease using Deep Learning Models," *Procedia Computer Science*, vol. 179, pp. 321–329, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.012>.
- [27] H. Liu and J. S. Chahl, "Proximal detecting invertebrate pests on crops using a deep residual convolutional neural network trained by virtual images," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 5, pp. 13–23, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2021.01.003>.
- [28] V. Partel, S. Charan Kakarla, and Y. Ampatzidis, "Development and evaluation of a low-cost and smart technology for precision weed management utilizing artificial intelligence," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 339–350, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.048>.
- [29] C. Hu, B. B. Sapkota, J. A. Thomasson, and M. V. Bagavathiannan, "Influence of Image Quality and Light Consistency on the Performance of Convolutional Neural Networks for Weed Mapping," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 11, p. 2140, May 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13112140>.
- [30] R. Kamath, M. Balachandra, and S. Prabhu, "Crop and weed discrimination using Laws' texture masks," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 191–197, 2020, doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201301.4920>.
- [31] V. N. T. Le, S. Ahderom, B. Apopei, and K. Alameh, "A novel method for detecting morphologically similar crops and weeds based on the combination of contour masks and filtered Local Binary Pattern operators," *GigaScience*, vol. 9, no. 3, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1093/gigascience/giaa017>.
- [32] S. Mishra, R. Sachan, and D. Rajpal, "Deep Convolutional Neural Network based Detection System for Real-time Corn Plant Disease Recognition," *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 2003–2010, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.236>.
- [33] P. Varalakshmi and S. Aravindkumar, "Plant disorder precognition by image based pattern recognition," *Procedia Computer Science*, vol. 165, pp. 502–510, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.018>.
- [34] U. P. Singh, S. S. Chouhan, S. Jain, and S. Jain, "Multilayer Convolution Neural Network for the Classification of Mango Leaves Infected by Anthracnose Disease," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43721–43729, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2907383>.
- [35] F. Pallottino et al., "Machine Vision Retrofit System for Mechanical Weed Control in Precision Agriculture Applications," *Sustainability*, vol. 10, no. 7, p. 2209, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/su10072209>.
- [36] P. Bosilj, T. Duckett, and G. Cielniak, "Connected attribute morphology for unified vegetation segmentation and classification in precision agriculture," *Computers in Industry*, vol. 98, pp. 226–240, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.003>.
- [37] E. Kiani and T. A. Mamedov, "Identification of plant disease infection using soft-computing: Application to modern botany," *Procedia Computer Science*, vol. 120, pp. 893–900, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.323>.

- [38] M. Montalvo et al., "Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 15, pp. 11889–11897, Nov. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.117>.
- [39] X. P. Burgos-Artizzu, A. Ribeiro, M. Guijarro, and G. Pajares, "Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 2, pp. 337–346, Feb. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.011>.
- [40] A. Tellaeche, G. Pajares, X. P. Burgos-Artizzu, and A. Ribeiro, "A computer vision approach for weeds identification through Support Vector Machines," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 908–915, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.01.011>.