

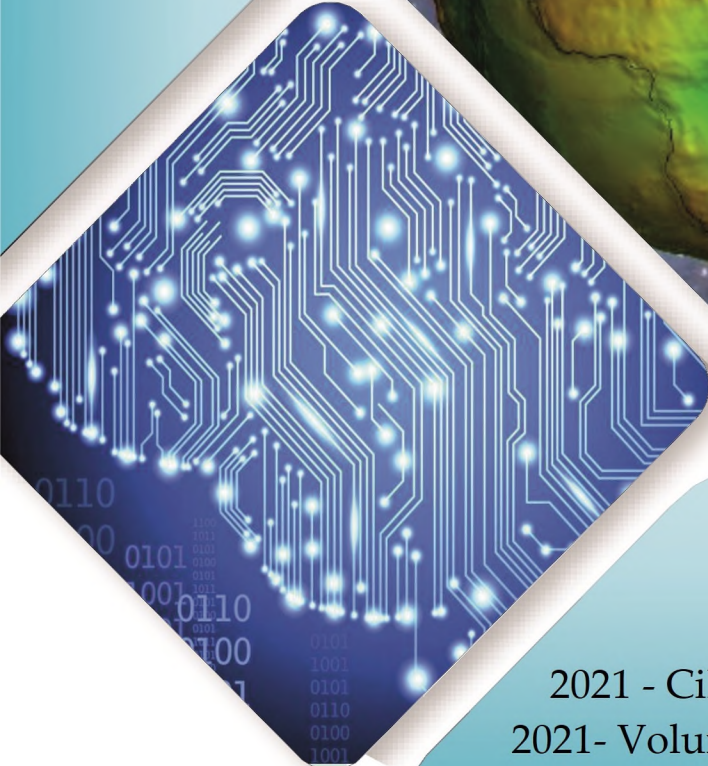


Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2021 - Cilt: 9 - Sayı: 3
2021- Volume: 9 - Issue: 3

**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. Ferruh YILDIZ**
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**

Chief Editor/Şef Editör

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Editors/Editörler

Prof. Dr. Halife KODAZ

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Section Editors/Alan Editörleri

Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM

Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN

Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN

Assist. Prof. Dr. Muhammed Arif EN

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof. Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University

Prof. Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University

Prof. Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University

Prof. Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University

Prof. Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University

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

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

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

Prof. Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University

Prof. Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University

Prof. Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Assist. Prof. Dr. 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)

Cilt	9	Eylül	2021	Sayı	3
Volume	9	September	2021	Issue	3

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

COMPARISON of TSC-2018 and TSC-2007 REGULATIONS for KONYA in TERMS of EQUIVALENT EARTHQUAKE LOAD METHOD

TSC-2018 ve TSC-2007 Yönetmeliklerinin Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi Açısından Konya Özelinde Kıyaslanması

Mustafa KOÇER, Mehmet UZUN, Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ (English) 535-550

DERS ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ELEKTRONİK TABLO TABANLI KARAR DESTEK SİSTEMİ

A Spreadsheet Based Decision Support System for Course Timetabling

Ebru GEÇİCİ, Mehmet Güray GÜLER 551-567

TÜRKİYE'DEKİ KELEBEK TÜRLERİNİN BASAMAKLI EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI

Production and Characterization of Polymeric Microbubble / Nanoparticles Using a Microfluidic Device

Bahadır ELMAS 568-587

AĞIRLIK MATRİSLERİNİN 3-SD HELİKOPTERİN DDRD TABANLI KONTROL METODU ÜZERİNE ETKİLERİ

Effects of Weighting Matrices on SDRE Based Control Method of 3-DoF Helicopter

Engin Hasan ÇOPUR 588-605

BATMIŞ HİDROLİK SIÇRAMADA GERİ DÖNÜŞ BÖLGESİ UZUNLUĞUNUN YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİYLE TAHMİNİ

Estimation of the Roller Length of Submerged Hydraulic Jumps using Artificial Intelligence Methods

Veysel GÜMÜŞ, İbrahim Mahmut YOLUK, Oğuz ŞİMŞEK,

Nazire Göksu SOYDAN OKSAL 606-620

ARI ALGORİTMASI (AA) VE PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (PSO) KULLANARAK ÇEYREK ARAÇ MODELİ TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Determining The Quarter Vehicle Model Design Parameters Using Bees Algorithm (BA) And Particle Swarm Optimization (PSO)

Onur ESER, Abdullah ÇAKAN, Fatih Mehmet BOTSALI, Mete KALYONCU 621-632

- SPORCULARIN KALP ATIM HIZININ ESP-NOW KULLANILARAK KABLOSUZ İLETİMİ**
Heart Rate in Athletes and Wireless Transmission Using ESP-NOW
Ömer Muhsin DÜNDAR, Ahmet AYDIN 633-646
- TRİLATERAL ÇEVİRİM-ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİM (TLÇ-ORÇ) VE ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİM-ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİM (ORÇ-ORÇ) BİRLEŞİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ**
Comparative Performance Analysis of Combined Power Systems Trilateral Cycle-Organic Rankine Cycle (TLC-ORC) and Organic Rankine Cycle Organic Rankine Cycle (ORC-ORC)
Nagihan BİLİR SAĞ, Mehmet ÖZÇELİK 647-665
- PİŞİRME EKİPMANI KAYNAKLI AĞIR METALLERİN TESPİT EDİLMESİ; NOHUT ÖRNEĞİ**
The Detection of Heavy Metals in Relation of Cooking Equipment; Chickpea Sample
Görkem TEYİN, Hatice Ferhan NİZAMLIOĞLU 666-675
- EFFECTS OF CALCINATION TEMPERATURE ON HYDROTHERMALLY SYNTHESIZED TITANIUM DIOXIDE SUBMICRON POWDERS**
Hidrotermal Olarak Sentezlenen Titanyum Dioksit Mikronaltı Tozları Üzerine Kalsinasyon Sıcaklığının Etkileri
Büşra BULUT, Şeyma DUMAN (English) 676-685
- KUMLU ZEMİNDE TEŞKİL EDİLEN KAZIKLI RADYE TEMEL SİSTEMLERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ: KKTC-LEFKE ÖRNEĞİ**
An Investigation of the Dynamic Behavior of Piled Raft Foundation Systems Constituted on Sandy Soil: The Example of TRNC-Lefke
Ömür ÇİMEN, Uğur OSMANOĞLU 686-701
- GRAFİT KATKILI SİKLO-OLEFİN KOPOLİMER (COC) KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**
Investigation of Tribological Properties of Graphite Filled Cyclo-Olefin Copolymer (COC) Composites
İbrahim KILINÇ, Salih Hakan YETGİN 702-712
- HYBRID THE ARITHMETIC OPTIMIZATION ALGORITHM FOR CONSTRAINED OPTIMIZATION PROBLEMS**
Kısıtlı Optimizasyon Problemleri İçin Hibrit Aritmetik Optimizasyon Algoritması
Emine BAŞ..... (English) 713-734
- ESNEK ROBOT KOL SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK BELİRLENMESİ**
Determination of LQR Controller Parameters for Flexible Link Manipulator System Using Metaheuristic Algorithms
Semih ÖZKAYA, Çağlar CONKER, Hasan Hüseyin BİLGİÇ 735-752
- MAKSİMUM YÜKSELTİCİ KONTROLLÜ T-KAYNAK İNVERTERİN ANALİZİ**
Analysis of T-Source Inverter with Maximum Boost Control
Mustafa Sacid ENDİZ 753-765
- INVESTIGATION OF WIND ENERGY POTENTIAL OF FOUR DIFFERENT SITES OF LIBYA BY USING WEIBULL DISTRIBUTION**
Libya'nın Dört Farklı Bölgesinin Rüzgâr Enerji Potansiyelinin Weibull Dağılımı ile İncelenmesi
Selcuk SELİMLİ, Fauzi Ammar Ahmed SHTEWI, Abdel Karim FAHED, Çağrı Yaman KOYMATCIK, Mehmet OZKAYMAK..... (English) 766-786

MORPHOLOGICAL, TEXTURAL AND THERMAL PROPERTIES OF LOW-COST SILICA AEROGEL COMPOSITES

Düşük Maliyetli Silika Aerogel Kompozitlerin Morfolojik, Yapısal ve Termal Özellikleri
Gülcihan GÜZEL KAYA, Hüseyin DEVECİ (English) 787-796

HAŞHAŞ TOHUM (Papaver somniferum L.) YAĞININ BİYODİZEL YAKIT ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Determination of The Biodiesel Fuel Characteristics of Poppy (Papaver somniferum L.) Seed Oil
Cüneyt CESUR, Tanzer ERYILMAZ, Tansu USKUTOĞLU, Hülya DOĞAN, Belgin COŞGE ŞENKAL, Selen ALNIAK SEZER 797-808

Derleme Makalesi (Review Article)

TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER İLE ENERJİ HASADI: TEORİK KÖKEN, ÇALIŞMA PRENSİBİ VE ÇALIŞMA MODLARI

Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) İletim Hatlarının Türkiye ve Dünyada Kullanımına İlişkin Ekonomik ve Teknik Bir İnceleme

Hakan ACAROĞLU, Atabak NAJAFI, Ömer KARA, Burcu YÜRÜK (English) 809-835

DIGITAL TWIN CONCEPT FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES

Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Dijital İkiz Konsepti

Göksel GÖKKUŞ 836-844



COMPARISON of TSC-2018 and TSC-2007 REGULATIONS for KONYA in TERMS of EQUIVALENT EARTHQUAKE LOAD METHOD

¹Mustafa KOÇER , ²Mehmet UZUN , ³Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ 

¹Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Civil Engineering, Konya, TURKEY

²Karamanoglu Mehmetbey University, Engineering Faculty, Civil Engineering, Karaman, TURKEY

¹mkocer@ktun.edu.tr, ²mehmetuzun@kmu.edu.tr, ³mtcogurcu@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 10.08.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.01.2021)

ABSTRACT: Earthquake motion is a complex movement that is difficult to understand. It is extremely important to understand and apply the earthquake movement correctly in order to affect the structure. There are three different methods in the literature for the application and calculation of the earthquake effect to the building. These methods are Equivalent Earthquake Load, Mode Combination and Analysis in Time History. Equivalent earthquake load method comes to the fore due to its ease of application and clarity. In the new earthquake regulation that entered into force in 2019, radical changes were made in the earthquake map used in the Equivalent Earthquake Load method. In this study, two building models with 3 floors and 9 floors were created and Equivalent Earthquake Load analysis was made according to TSC-2007 and TSC-2018 conditions. Results have been compared with each other.

Keywords: Reinforced concrete, equivalent seismic load, TSC-2007, TSC-2018

TSC-2018 ve TSC-2007 Yönetmeliklerinin Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi Açısından Konya Özelinde Kıyaslanması

ÖZ: Deprem hareketi karmaşık anlaşılması zor bir harekettir. Deprem hareketinin yapıya etki ettirilebilmesi için doğru bir şekilde anlaşılacak uygulanması son derece önemlidir. Deprem etkisinin yapıya uygulanması ve hesaplanması için literatürde üç farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler Eşdeğer Deprem Yüğü, Mod Birleştirme ve Zaman Tanım Alanında Analiz yöntemleridir. Uygulama kolaylığı ve anlaşılmasının kolay olması Eşdeğer deprem Yüğü yöntemini ön plana çıkarmaktadır. Türkiye’de 2019 yılında yürürlüğe giren yeni deprem yönetmeliği ile birlikte Eşdeğer Deprem Yüğü yönteminde köklü değişiklikler yapılmıştır. Bu çalışmada 3 katlı ve 9 katlı iki bina modeli oluşturularak TSC-2007 ve TSC-2018 şartlarına göre Eşdeğer Deprem Yüğü analizi yapılmıştır. Sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, eşdeğer deprem yüğü, TDY-2007, TBDY-2018

1. INTRODUCTION

During the design of structures, dead loads and live loads can be calculated with high accuracy with certain statistics and mathematical calculations. However, the calculation of dynamic loads such as earthquake and wind, which are expected to affect the structures, is a very complex issue. The effect of the earthquake on the structure varies with parameters such as fault characteristics, ground condition and behavior of the structure. Especially the mistakes made during the building design increase the destructive effect of the earthquake (Keskin and Bozdoğan, 2018). Since our country is a country in the earthquake zone, accurate calculation of earthquake load is an important study subject. There are generally three different methods in the calculation of earthquake motion. These methods are Equivalent Earthquake Load, Mode Combination and Time History Analysis.

A new earthquake regulation was published in our country in 2018. Turkey Earthquake Building Regulations (TSC-2018) is made with fundamental changes in many aspects. While the earthquake hazard class of 46 provinces was decreased in the regulation, the earthquake hazard class of 6 provinces was increased. Furthermore, according to the previous regulations TSC-2007, while 43% of the population of Turkey was taking place in the highest region of the threat of earthquakes, this ratio was reduced to 27% in TSC-2018 (Basaran, 2018).

Radical changes were made regarding the Equivalent Earthquake Load Method (EDY) with the new regulation. Building Height Classes (BYS), Strength Redundancy Coefficient (D), design spectral acceleration coefficient (SDS) for short period region, design spectral acceleration coefficient (SD1) for 1.0 second period, changes in ground classes, definition of effective section stiffness in linear analysis and removing the classification of earthquake zones, etc. are some of them.

While many studies with Equivalent Earthquake Load Method are available in the literature, there are limited studies on examining the differences of TSC-2007 and TSC-2018 regulations. Demir and Donmez calculated the earthquake load affecting different structures with the same plan geometries in Z1, Z2, Z3 and Z4 ground classes, and with the Equivalent Earthquake Load Method according to TSC-2007. Based on the results obtained have been viewed torsional irregularity in the structure (Demir and Donmez, 2008). Kumbasaroglu and Celik calculated the earthquake load that a historic masonry building can be exposed to using the Equivalent Earthquake Load Method. They examined the linear performance of the structure exposed to earthquake load (Kumbasaroglu and Celik, 2019). Ucar and Merter produced spectrum curves to be used for Equivalent Earthquake Load Method and Mode Combination Method from real earthquake records. For the Time History Analysis Method, they used the acceleration records of the same earthquake. They created 5, 8 and 10-storey reinforced concrete building models and compared the results for three different earthquake calculation methods (Ucar and Merter, 2009). Basaran analyzed two different buildings with 5 and 10 floors using the equivalent Earthquake Load Method given in TSC-2007 and TSC-2018 regulations and compared the results (Basaran, 2018). Balun *et al.* compared the standard earthquake spectrum given in TSC-2018 with the base shear forces obtained according to the simplified design rules defined in section 17 (Balun *et al.*, 2020). Ozer and Bahadir have made an interactive analysis of a 13-storey building on a rigid basement in Z3 according to TSC-2007 and ZD ground class according to TSC-2018 (Ozer and Yuksel, 2020). Song *et al.*, estimated the equivalent earthquake load parameters in the study. (Song *et al.*, 2018). Dogangun and Livaoglu compared the methods of Equivalent Earthquake Load, Mode Combination and Time History Analysis in their studies (Dogangun and Livaoglu, 2006). Tezcan and Alhan made the earthquake load calculations for the building models with torsional irregularities using the Equivalent Earthquake Load method and dynamic analysis methods (Tezcan and Alhan, 2001). Humar and Mahgoub calculated the earthquake force to be used in the design according to the Canadian earthquake code (NBCC-2005) using the Equivalent Earthquake Load Method (Humar and Mahgoub, 2003).

In this study, three-layer and 9-layer is formed on two different structural models in ETABS program (ETABS, 2020). Building models have been analyzed according to the Equivalent Earthquake Load Method given in TSC-2007 and TSC-2018. The results obtained were compared. The differences between TSC-2007 and TSC-2018 codes have been examined in terms of equivalent earthquake load.

2. MATERIAL AND METHOD

Two different models of 3 floors and 9 floors were created within the scope of the study. The 3-storey building model is given in Figure 1.

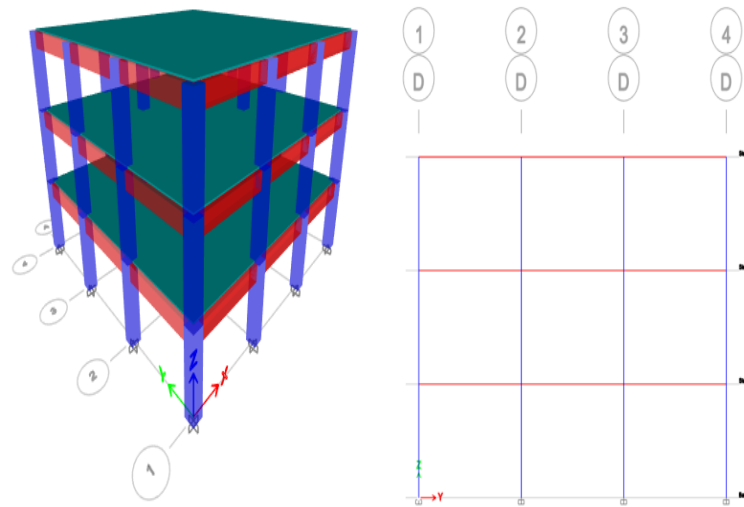


Figure 1. 3-storey building model

The 9-storey building model is given in Figure 2.

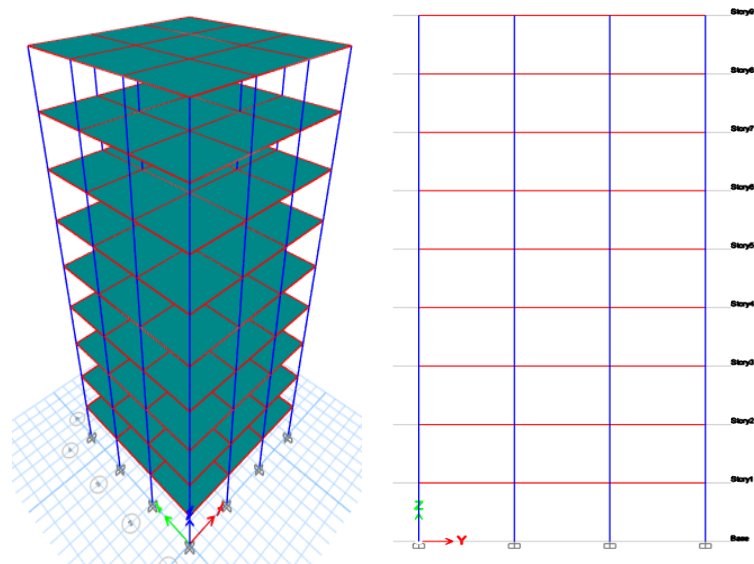


Figure 2. 9-storey building model

The parameters used during the creation of the buildings are given in Table 1. The parameters given in the Table 1 have been selected by taking into account the minimum requirements in the codes.

Table 1. Parameters used in creating the model

No	Description	3-storey	9-storey
1	Number of floors	3	9
2	Plan dimensions	12m*12m	12m*12m
3	Floor thickness	15cm	15cm
4	Beam dimensions	30cm * 60cm	30cm * 60cm
5	Column dimensions	50cm * 50cm	50cm * 50cm
6	Concrete and Steel grade	30MPa/ B420C	30MPa/ B420C
8	Floor loads	Pavement+Coating 0,2 t/m ² , Live Load 0,2 t/m ²	Pavement+Coating 0,2 t/m ² , Live Load 0,2 t/m ²
9	Wall load	0,25 t/m ²	0,25 t/m ²
11	Building importance factor	1	1
12	Ground Class	Z4, ZD	Z4, ZD
13	Building behavior coefficient	8	8

The design spectrum curve defined in the TSC-2007 regulation is given in Figure 3.

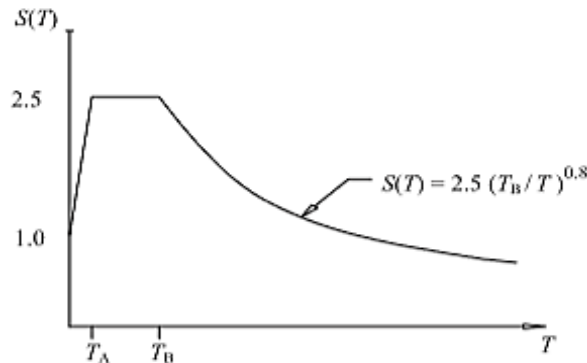


Figure 3. TSC-2007 design spectrum curve (*Turkish Seismic Code (TSC-2007) (2007) Specifications for buildings to be built in seismic areas., 2007*)

The formulas given in Figure 3 to calculate the spectrum coefficient in three different regions are defined in (1), (2) and (3):

$$S(T) = 1 + 1.5 \frac{T}{T_A} \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad (1)$$

$$S(T) = 2.5 \quad (T_A < T < T_B) \quad (2)$$

$$S(T) = 2.5 \left(\frac{T_B}{T}\right)^{0.8} \quad (T_B < T) \quad (3)$$

Here, $S(T)$, T , T_A and T_B represent the spectrum coefficient, natural vibration period and spectrum characteristic periods, respectively. Soil characteristic periods are defined in Table 2 depending on local soil classes.

Table 2. Soil characteristic periods (*Turkish Seismic Code (TSC-2007) (2007) Specifications for buildings to be built in seismic areas., 2007*)

Local Soil Class	T_A (s)	T_B (s)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

The spectral acceleration coefficient is calculated with formula (4), with the help of the design spectrum coefficient.

$$A(T) = A_0 I S(T) \quad (4)$$

Here, $A(T)$, A_0 and I represent the spectral acceleration coefficient, effective ground acceleration coefficient and building importance coefficient, respectively.

The effective ground acceleration coefficient is classified according to earthquake zones in Table 3.

Table 3. Effective ground acceleration coefficient (*Turkish Seismic Code (TSC-2007) (2007) Specifications for buildings to be built in seismic areas., 2007*)

Earthquake Zone	A_0
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

The earthquake zones given in Table 3 are shown in Figure 4.

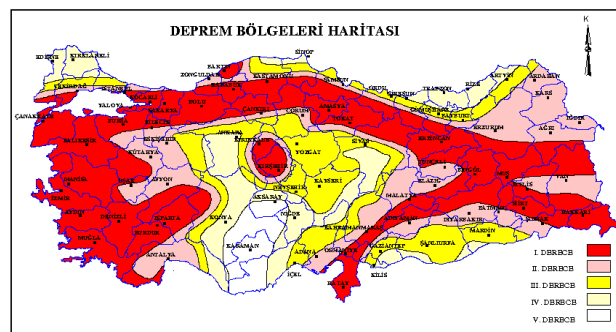


Figure 4. TSC-2007 earthquake zone map (*Turkish Seismic Code (TSC-2007) (2007) Specifications for buildings to be built in seismic areas., 2007*)

The total equivalent earthquake load affecting the building is calculated with Equation 5, Using the spectral acceleration coefficient obtained by Equation 4.

$$V_t = \frac{WA(T)}{R_d(T)} \geq 0.10A_0IW \quad (5)$$

Here, V_t , W and $R_d(T)$ denote the total equivalent earthquake load affecting the building, the weight of the earthquake-based structure and the earthquake load reduction coefficient, respectively.

The horizontal elastic design acceleration spectrum defined in the TSC-2018 regulation is given in Figure 5.

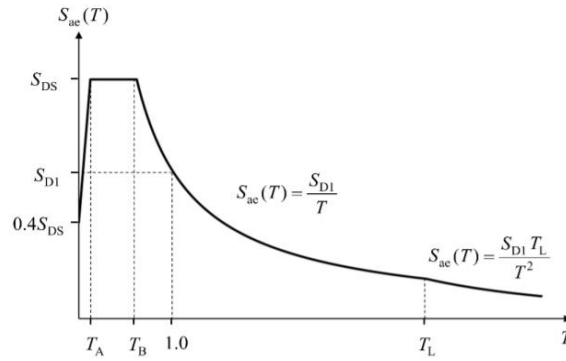


Figure 5. TSC-2018 horizontal elastic design acceleration spectrum (*Turkish Seismic Code-2018 (TSC-2018), 2018*)

The formulas given in Figure 5 to calculate the horizontal elastic design spectral acceleration in four different regions are defined in equations (6), (7), (8) and (9) respectively:

$$S_{ae}(T) = (0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}) S_{DS} \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad (6)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \quad (T_A \leq T \leq T_B) \quad (7)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \quad (T_B \leq T \leq T_L) \quad (8)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (T \leq T_L) \quad (9)$$

Here, $S_{ae}(T)$, T , T_L , S_{DS} , S_{D1} , T_A and T_B are respectively the horizontal elastic design spectral acceleration, the natural vibration period, the transition period to the constant displacement zone in the horizontal elastic design spectrum, the design spectral acceleration coefficient for the short period region, the period of 1.0 seconds. design spectral acceleration coefficient for the design, horizontal elastic design refer to the acceleration spectrum corner period.

The earthquake hazard map defined in TSC-2018 is given in Figure 6.

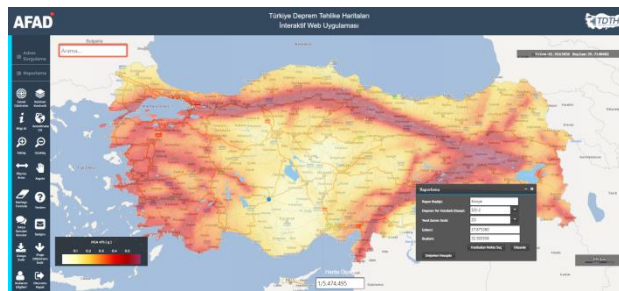


Figure 6. TSC-2018 earthquake hazard map (*Turkish Seismic Code-2018 (TSC-2018), 2018*)

The total equivalent earthquake load that will affect the building is calculated with the formula (10).

$$V_{tE} = m_t S_{aR}(T) \geq 0.04 m_t I S_{DS} g \quad (10)$$

Here, V_{tE} , m_t , $S_{aR}(T)$ and g refer to the total equivalent earthquake load affecting the building, the structure weight based on earthquake, reduced design spectral acceleration and gravitational acceleration, respectively.

TSC-2007 and TSC-2018 codes have given some rules limiting the relative storey drift in order to prevent excessive displacements and the additional internal forces due to excessive drift that may occur in the structure during an earthquake.

In TSC-2007, the limitation of the relative floor displacements is calculated with the formulas (11), (12) and (13), taking into account the floor drifts given in Figure 7.

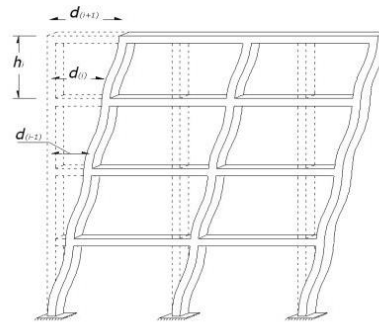


Figure 7. Relative story drift (*Turkish Seismic Code (TSC-2007) (2007) Specifications for buildings to be built in seismic areas., 2007*)

$$\Delta_i = d_i - d_{(i-1)} \quad (11)$$

$$\delta_i = R\Delta_i \quad (12)$$

$$(\delta_i)_{max}/h_i \leq 0.02 \quad (13)$$

Here, d_i , Δ_i , δ_i , $(\delta_i)_{max}$ ve R refer to respectively the displacement calculated according to the reduced earthquake loads on the i 'th floor of the building, the reduced relative storey displacement on the i 'th floor of the building, the effective relative storey displacement on the i 'th floor of the building, the maximum effective relative storey displacement on the i 'th storey of the building, structural behavior coefficient. Limitation of relative floor offsets in TSC-2018 is calculated with the following formulas (14), (15) and (16).

$$\Delta_i = u_i - u_{(i-1)} \quad (14)$$

$$\delta_i = \frac{R}{I} \Delta_i \quad (15)$$

$$\lambda \frac{(\delta_i)_{max}}{h_i} \leq 0.008\kappa \quad (16)$$

Here, Δ_i , u_i , δ_i , $(\delta_i)_{max}$, I , h_i , R , λ and κ refer to respectively the reduced relative storey displacement expressing the difference in displacement between two consecutive floors for any column or shear wall, the reduced displacement on the i 'th floor for the column or shear wall, the effective relative floor displacement for the column or shear wall on the i th floor of the building, the highest value of the effective relative floor displacements on the i 'th floor of the building, the building importance coefficient, the height of the i 'th floor, the structural behavior coefficient, the empirical coefficient used in limiting the relative storey displacements and a coefficient used in limiting the relative storey displacements (1 for reinforced concrete buildings, 0.5 for steel buildings).

Additional loads may occur in the structure as a result of the increase in the plastic deformations in the structural elements. These additional loads occur due to increasing the deformation and displacements in the structural elements as shown in Figure 8.

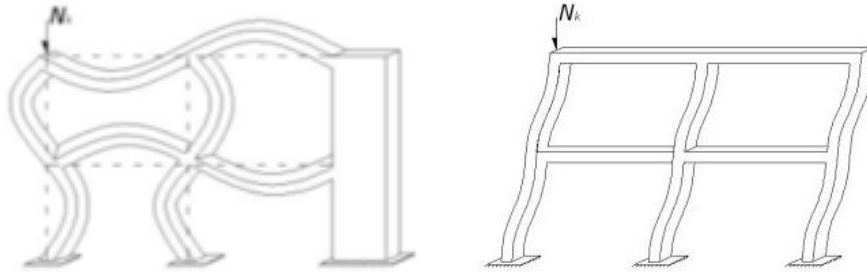


Figure 8. Second-order effects

The second order effects that may occur in the structure are limited in TSC-2007 and TSC-2018. The formula used to calculate second order effects in TSC-2007 is given in (17).

$$\theta_i = (\Delta_i)_{ort} \Sigma w_i / V_i h_i \leq 0.12 \quad (17)$$

Here, θ_i , $(\Delta_i)_{ort}$, V_i , w_i and h_i refer to respectively, the second order effect indicator defined at i 'th story of building, the average reduced relative floor displacement on the i 'th floor of the building, the earthquake force acting on the i 'th floor of the building, the weight of i 'th story of building by considering live load participation factor, height of i 'th story of building.

The formula used to calculate second-order effects in TSC-2018 is given in Formula (18).

$$\theta_{II,i} = \frac{(\Delta_i)_{ort} \Sigma_{k=i}^N w_k}{V_i h_i} \leq 0.12 \frac{D}{C_h R} \quad (18)$$

Here, $\theta_{II,i}$, $(\Delta_i)_{ort}$, V_i , w_k , h_i , D , C_h , R refer to to respectively, the second order effect indicator defined at i 'th story of building, average story of i 'th story of building, story shear at i 'th story of building in the earthquake direction considered, the total weight of building by considering live load participation factor, height of i 'th story of building, overstrength coefficient, a coefficient defined depending on the nonlinear hysteretic behavior of the structural system

(0.5 for reinforced concrete buildings, 1.0 for steel buildings), the structural behavior coefficient.

In the study, spectrum curves were obtained for both regulations specific to Konya province. In TSC-2007, the local soil class was taken as Z4. In TSC-2018, the closest soil class to this, the ZD class, was taken. Design spectrum curves obtained depending on local soil classes are given in Figure 9.

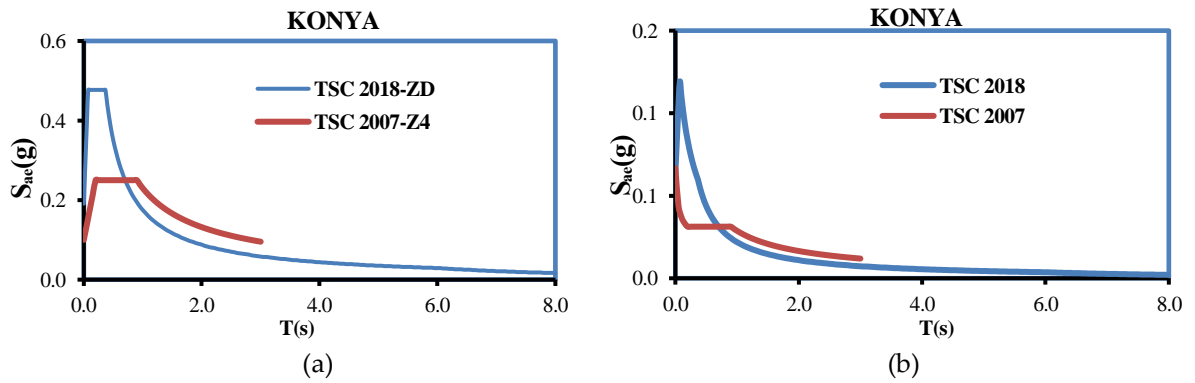


Figure 9. Spectrum curves, (a) design spectrum, (b) reduced design spectrum

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The mode deformations in the 1st, 2th and 3rd modes obtained from the buildings as a result of the analysis are given in Figure 10.

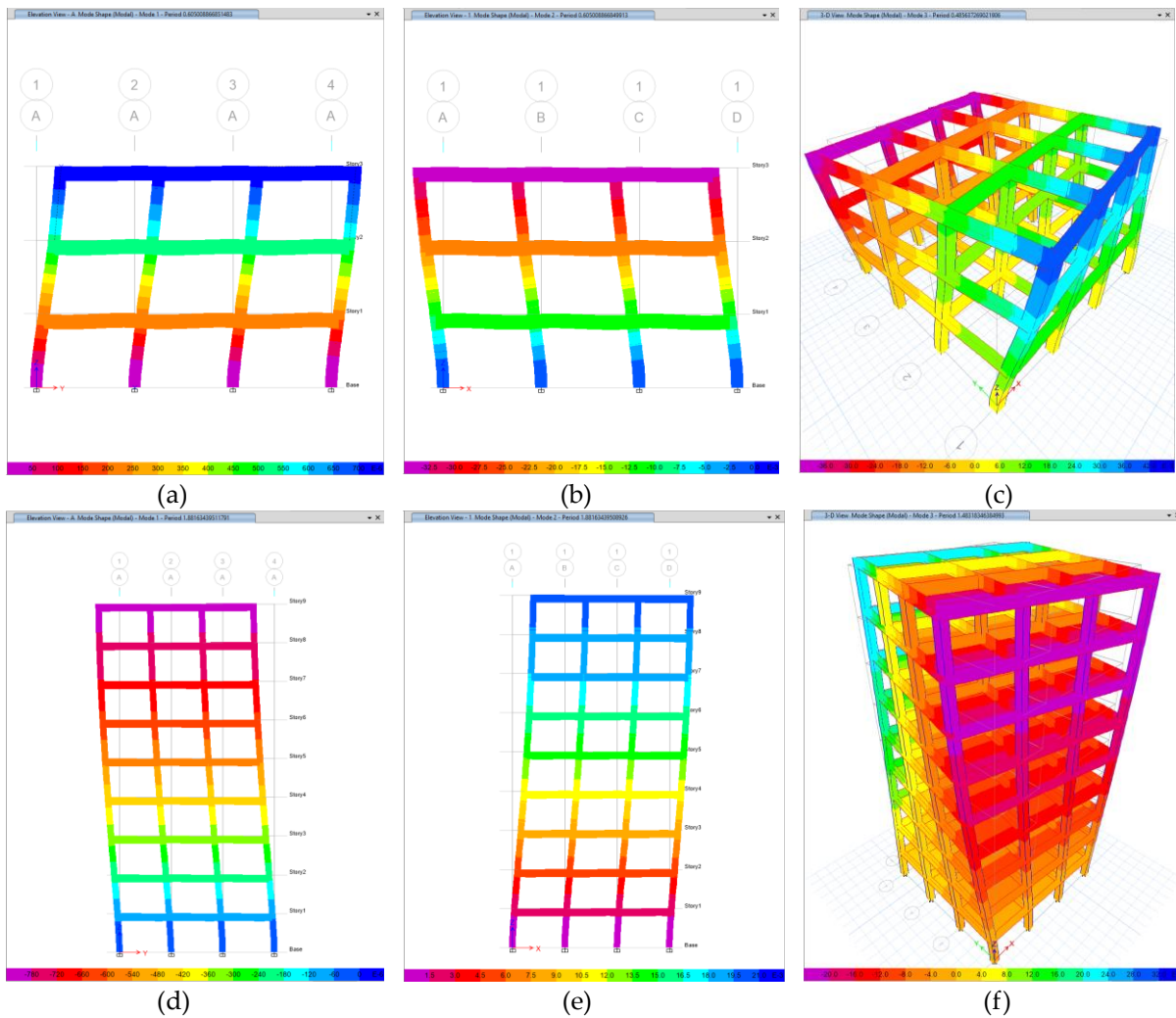


Figure 10. Mode deformations, (a) 1st mode for 3-story building, (b) 2th mode for 3-story building, (c) 3rd mode for 3-story building, (d) 1st mode for 9-story building, (e) 2th mode for 9-story building, (f) 3rd mode for 9-story building

The floor shear forces affecting the buildings are given in Figures 11 and 12. The floor shear forces were obtained from ETABS.

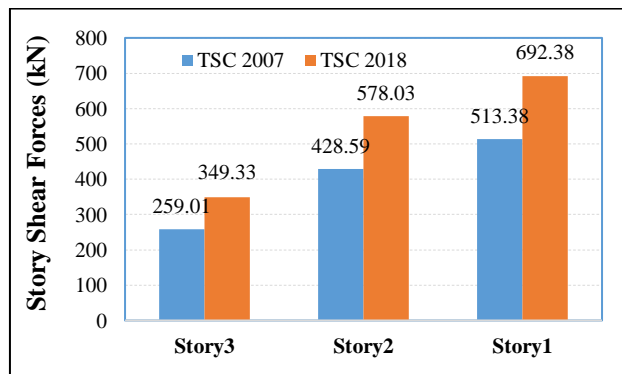


Figure 11. Floor shear forces for a 3-storey building

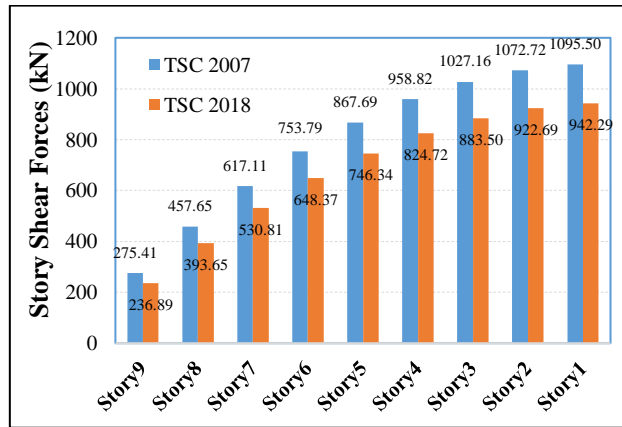
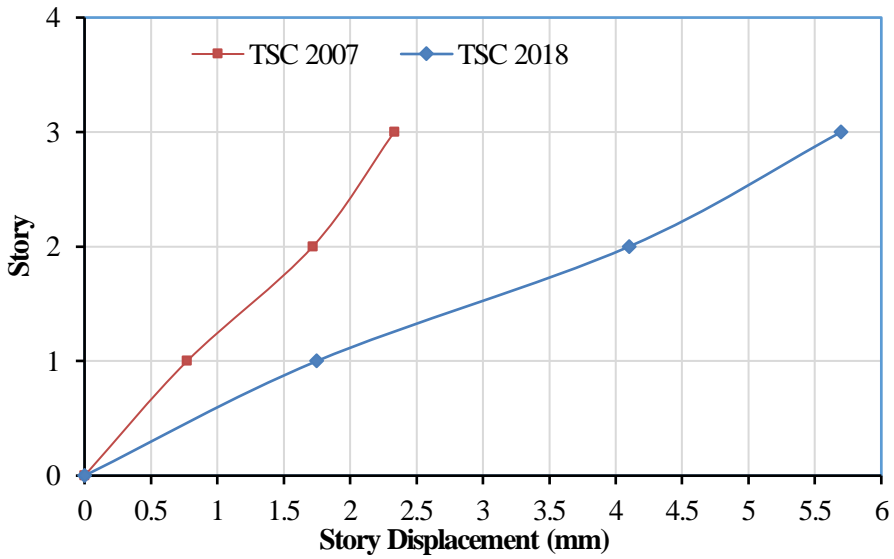
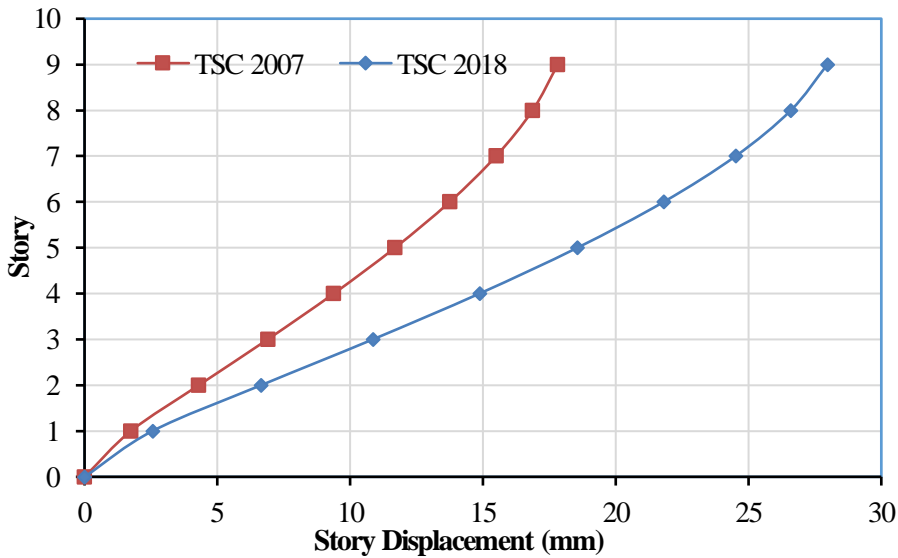


Figure 12. Floor shear forces for a 9-storey building

When the floor shear forces of the 3-storey building given in Figure 11 are examined, the results obtained from the TEC 207 code are higher, and when the floor shear forces of the 9-storey building in Figure 12 are examined, the results obtained from the TEC 2018 code are higher. Similar to the spectrum curves obtained for the Konya region, if the natural vibration period of the building is greater than the soil characteristic periods, higher earthquake forces are obtained with the TEC 2007. On the other hand, if it is between the soil characteristic periods, higher earthquake forces are obtained with the TEC 2018. Floor displacements for a 3-storey and 9-storey building are given in Figure 13.



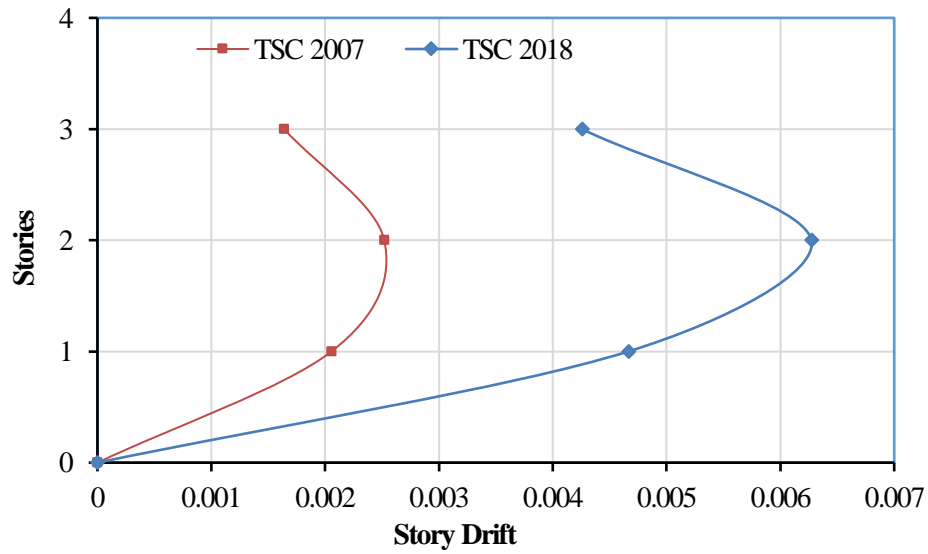
(a)



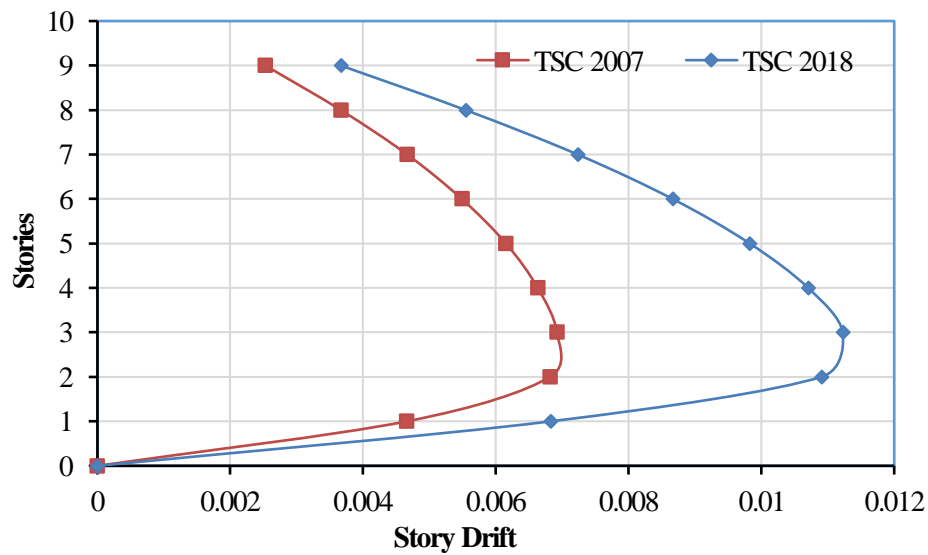
(b)

Figure 13. Floor displacements, (a)
3-storey building, (b) 9-storey building

In terms of floor displacements given in Figure 13, again high results were obtained in TSC-2018 regulation. The total equivalent earthquake load is 35% less for a 3-storey building and 16% less for a 9-storey building compared to TSC-2018 in the values calculated with TSC-2007. The values obtained for the floor drift are given in Figure 14.



(a)



(b)

Figure 14. Floor displacement, (a) 3-storey building, (b) 9-storey building

In the calculations made to limit the second-order effects that may occur on buildings, it was observed that second-order effects did not occur on 3 and 9-storey buildings for TSC-2007 and TSC-2018 regulations. The results are given in Table 4 for a 3-storey building and in Table 5 for a 9-storey building. As seen in Table 4, the second-order effects were below the limit values for both codes. As seen in Table 5, the second-order effects were below the limit values for 9-storey buildings.

Table 4. Limitation of second order effects for a 3-storey building, (a) TSC-2007, (b) TSC-2018

Story	Hi (mm)	$\Delta i(\text{ort})$ (mm)	ΣW_j (t)	Vi (tf)	vi*hi (t.fm)	${}^0i=\Delta i(\text{ort})*\Sigma W_i /$ vi*hi	${}^0i\leq 0,12$
Story3	3000	0.614	552.6	25.90107	77703.21	0.004366569	0.004366569
Story2	3000	0.946	1105.2	42.85869	128576.07	0.008131522	0.008131522
Story1	3000	0.772	1657.8	51.3375	154012.5	0.008309855	0.008309855

(a)

Story	Hi (mm)	$\Delta i(\text{ort})$ (mm)	ΣW_j (t)	Vi (tf)	vi*hi (t.fm)	${}^0i=\Delta i(\text{ort})*\Sigma W_i$ / vi*hi	${}^0i\leq 0,12D/C_hR=0.09$
Story3	3000	1.597	552.6	34.93252	104797.56	0.00842102	0.008421019
Story2	3000	2.352	1105.2	57.8031	173409.3	0.01499014	0.014990144
Story1	3000	1.748	1657.8	69.23838	207715.14	0.013951	0.013951002

(b)

Table 5. Limitation of second order effects for a 9-storey building, (a) TSC-2007, (b) TSC-2018

Story	Hi (mm)	$\Delta i(\text{ort})$ (mm)	ΣW_j (t)	Vi (tf)	vi*hi (t.fm)	${}^0i=\Delta i(\text{ort})*\Sigma W_i /$ vi*hi	${}^0i\leq 0,12$
Story9	3000	0.948	558	27.5407	82622.1	0.006402452	0.006402452
Story8	3000	1.376	1110.6	45.76494	137294.82	0.011130687	0.011130687
Story7	3000	1.747	1663.2	61.71115	185133.45	0.015694681	0.015694681
Story6	3000	2.059	2215.8	75.37933	226137.99	0.020174992	0.020174992
Story5	3000	2.305	2768.4	86.76948	260308.44	0.02451385	0.02451385
Story4	3000	2.487	3321	95.88159	287644.77	0.028713635	0.028713635
Story3	3000	2.594	3873.6	102.71568	308147.04	0.032608194	0.032608194
Story2	3000	2.557	4426.2	107.27174	321815.22	0.035168608	0.035168608
Story1	3000	1.745	4978.8	109.54977	328649.31	0.026435491	0.026435491

(a)

Story	Hi (mm)	$\Delta i(\text{ort})$ (mm)	$\Sigma W_j(t)$	Vi (tf)	vi*hi (t.fm)	${}^0i=\Delta i(\text{ort})*\Sigma W_i$ / vi*hi	${}^0i\leq 0,12D/C_hR=0.09$
Story9	3000	1.375	558	23.68903	71067.09	0.010796136	0.010796136
Story8	3000	2.08	1110.6	39.36453	118093.59	0.019561163	0.019561163
Story7	3000	2.712	1663.2	53.0806	159241.8	0.028325467	0.028325467
Story6	3000	3.248	2215.8	64.83723	194511.69	0.036999927	0.036999927
Story5	3000	3.684	2768.4	74.63442	223903.26	0.045549965	0.045549965
Story4	3000	4.015	3321	82.47218	247416.54	0.053892173	0.053892173
Story3	3000	4.208	3873.6	88.35049	265051.47	0.0614979	0.0614979
Story2	3000	4.088	4426.2	92.26937	276808.11	0.065367686	0.065367686
Story1	3000	2.559	4978.8	94.22881	282686.43	0.045070254	0.045070254

(b)

4. CONCLUSIONS

Turkey in January-2019 history of the most important changes made with the entering into force of the abolition of the concept of the TSC-2018 earthquake. instead, Turkey Earthquake Hazard Map is modified based on the spectral information depending on the location of the structure. Besides, while the statistical parameters for the standard design earthquake ground motion in the TSC-2007 earthquake code are preserved, three additional earthquake levels have been added for special structures.

- In the base shear forces obtained from the current and old earthquake regulations, if the building period is between the ground dominant periods, higher values were obtained in TSC-2018, if greater than T_B , in TSC-2007.
- When storey displacements and relative storey displacements are compared, more unfavorable results were obtained in design according to TSC-2007 regulation, due to the effective section stiffness coefficient required to be used in the analysis of linear calculation methods in the TSC-2018 regulation.
- The second-order effects obtained after the analysis of the 3 and 9-storey buildings were below the limit values according to both regulations.
- In the TSC 2018 regulation, since the concept of earthquake zone is removed, map-based spectral acceleration values are calculated according to the distance of the coordinates to the fault.
- According to the reduced design graph, in TSC 2018, the elastic spectral acceleration value is at the maximum level in $T = T_B$ period. In TSC 2007, it is obtained at $T = T_0$.

REFERENCES

- Balun, B., Nemutlu, O. F., & Sari, A., 2020, "Investigation Of The Effect of TEC 2018 Simplified Design Rules On Base Shear Force" *Turkish Journal of Nature and Science*, 9, 173–181. <https://doi.org/10.46810/tdfd.749257>
- Basaran, V., 2018, "Evaluation of Seismic Loads for Afyonkarahisar According to Turkish Seismic Code (TSC2019)", *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 18(3), 1028–1035. <https://doi.org/10.5578/fmbd.67739>
- Demir, A., & Donmez, D., 2008, "The Factors Affecting Torsional Irregularity in Multi-Storey Structures", *Celal Bayar University Journal of Science*, 4, 31–36.
- Dogangun, A., & Livaoglu, R., 2006, "Comparison of Seismic Analysis Methods for Multistory Buildings", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, (1314), 1–10. Geneva, Switzerland.
- ETABS, 2020, "Integrated Software for Structural Analysis & Design", Computers and Structures Inc.
- Humar, J., & Mahgoub, M. A., 2003, "Determination of seismic design forces by equivalent static load method", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(2), 287–307. <https://doi.org/10.1139/102-067>
- Keskin, E., & Bozdogan, K. B., 2018, "Evaluation of 2007 And 2018 Turkish earthquake code For The Province of Kırklareli", *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 4(1), 74–90.
- Kumbasaroglu, A., & Celik, A., 2019, "Assessment of Seismic Performance Level of a Historical Masonry Structure Using Equivalent Seismic Load Method", *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 12(3), 1590–1600. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.619692>
- Ozer, O., & Yuksel, S. B., 2020, "Comparing Analysis Results Of Tall Buildings Which Takes Earthquake Effects By Reinforced Concrete Frames And Shear Walls Together According To TBEC 2018 And TEC 2007", *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 931–945. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.694781>
- Song, J., Gao, Y., Feng, T., & Xu, G., 2018, "Effect of site condition below slip surface on prediction of equivalent seismic loading parameters and sliding displacement", *Engineering Geology*, 242, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.003>
- Tezcan, S. S., & Alhan, C., 2001, "Parametric analysis of irregular structures under seismic loading according to the new Turkish Earthquake Code", *Engineering Structures*, 23, 600–609.

[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00084-5)

Turkish Seismic Code-2018 (TSC-2018), 2018, Ankara, Turkey: Disaster and Emergency Management.

Turkish Seismic Code (TSC-2007), 2007, "Specifications for buildings to be built in seismic areas", Ankara, Turkey: Ministry of Public Works and Settlement.

Ucar, T., & Merter, O., 2009, "Effect of Configuration of Shear Walls at Floor Plan to Earthquake Behavior of Shear Wall-Frame Reinforced Concrete Buildings", *Dokuz Eylül University Engineering Faculty Journal of Science and Engineering*, 11(2), 11–18.



DERS ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ELEKTRONİK TABLO TABANLI KARAR DESTEK SİSTEMİ

¹Ebru GEÇİCİ , ²Mehmet Güray GÜLER 

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE
¹egecici@yildiz.edu.tr, ²mgguler@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 18.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.05.2021)

ÖZ: Bu çalışmada bir mühendislik bölümünün ders çizelgeleme problemi (DÇP) ele alınmıştır. Gerçekleşen köklü müfredat değişikliği, giderek artan öğrenci ve program sayısına karşın azalan öğretim elemanı sayısı ve son yıllarda öğrencilerin uzun dönemli staj için günlerini boşaltma istekleri nedeniyle bölümün ders çizelgelerini hazırlamak oldukça zorlaşmıştır. Bu problemi çözebilmek için bölüme ait dokuz adet programın derslerini çizelgeleyen bir karma tam sayılı programlama (KTP) modeli kurulmuş ve bu modeli açık kaynak kodlu çözücü kullanarak çözen bir karar destek sistemi (KDS) geliştirilmiştir. Herhangi bir teknik bilgi (kodlama ve optimizasyon gibi) gerektirmeyen bu KDS sayesinde öğretim elemanlarının isteklerini karşılayan, öğrencilerin iki günlerini boş bırakarak uzun dönemli staj imkanı sağlayan ders programları kısa sürede elde edilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ders çizelgeleme problemi, karar destek sistemi, karma tam sayılı programlama

A Spreadsheet Based Decision Support System for Course Timetabling

ABSTRACT: In this study, the course scheduling problem (CSP) of an engineering department is addressed. It has been very difficult to prepare the course schedules of the department due to a radical curriculum change, increasing number of students and programs, decreasing number of faculty members, and request of the students in recent years to have lecture-free days to attend long-term internships. A mixed-integer programming (MIP) model is proposed to schedule nine different programs in the department and a decision support system (DSS) that solves this model using an open source solver is developed. The DSS, which does not require any technical knowledge (coding and optimization), is able to generate schedules that address the requests of faculty members and leaves two lecture-free days for the students for long-term internships, in a short time.

Keywords: Course scheduling problem, decision support system, mixed integer programming

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ders çizelgeleme problemi (DÇP), bir akademik takvim içerisinde öğretim elemanlarının tercihleri ve kurumun yasal koşullarının dikkate alınarak haftalık olarak takip edilecek programın oluşturulması işlemidir. Her akademik takvim içerisinde iki kez hazırlanan (güz dönemi ve bahar dönemi) ders çizelgelerinin yapısı üniversiteden üniversiteye ve hatta üniversite bünyesinde yer alan bölümler arasında bile farklılık göstermektedir. Buna bağlı olarak her birimin çizelgeleri kendi idari yapıları dikkate alınarak kurumda görevli olan bir kişi veya bir komisyon tarafından çoğu zaman manuel olarak hazırlanmaktadır. Manuel olarak hazırlanan bu çizelgeleri oluşturmak ise oldukça zaman alan ve zor bir işlemdir. Bu nedenle konu üzerine yapılan birçok çalışma mevcuttur (Altunay ve Eren, 2016). Buna rağmen bu

çalışmaların çoğu herhangi bir karar destek sistemine (KDS) dönüştürülmediği için elde edilen çözümlerin devamlılıkları sağlanamamıştır. KDS'ye dönüştürülen çalışmalar ise kuruma özel oldukları için farklı kurumlar tarafından kullanılamamaktadır.

Köklü bir geçmişe sahip olan kurumlar, dengeli bir sisteme ulaştıkları için çoğu zaman bir kez hazırladıkları çizelgeyi sonraki yıllar için de kullanabilmektedir. Buna rağmen müfredat değişikliği, öğrenci sayısına bağlı olarak artan ders grup sayısı, mevcut kaynakların bu ihtiyacı karşılamada yetersiz kalması gibi faktörler farklı çizelgelerin kullanılması ihtiyacını ortaya çıkarabilmektedir. Türkiye'nin en eski eğitim kurumlarından biri olan Yıldız Teknik Üniversitesi'nin (YTÜ) Endüstri Mühendisliği (EM) Bölümüne ait ders çizelgelerinin oluşturulması işleminde de son birkaç yılda yaşanan gelişmeler nedeniyle köklü bir değişim ihtiyacı oluşmuştur. Öncelikle bölümdeki iki lisans programı (%30 İngilizce ve %100 İngilizce) Bologna süreci kapsamında 2018 yılı içerisinde ciddi bir müfredat değişikliğine uğramıştır. Buna ek olarak lisans programlarındaki kontenjanların artışı nedeniyle aynı dersin birden fazla grup halinde açılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ders ihtiyacındaki artışın aksine farklı kurumlara geçen, emekli olan ve ciddi sağlık problemi yaşayan öğretim elemanları nedeniyle öğretim elemanı sayısında düşüş yaşanmıştır. YTÜ-EM'de iki lisans programı dışında üç tanesi ikinci öğretim programı olmak üzere tam yedi adet lisansüstü programı vardır. Dolayısıyla bölüm toplamda dokuz program yürütmektedir. Bahsi geçen bu nedenler yüzünden önceki ders programlarının kullanılabilirliği kalmamış ve yeni ders programlarının hazırlanması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ayrıca günümüz koşullarında üçüncü ve özellikle dördüncü sınıf öğrencilerinin uzun dönemli staj programlarında yer almak için ders programlarını boşaltmak istemeleri problemi daha da zor bir hale getirmiştir.

Yapılan bu çalışmada, öncelikle YTÜ-EM'ye ait DÇP için bir karma tam sayılı programlama (KTP) modeli önerilmiştir. Sonrasında ise bölüm kuralları ve öğretim elemanlarının isteklerini karşılayan bu KTP modeli MS Excel'in bir eklentisi olan Solver Studio kullanılarak bir KDS'ye dönüştürülmüştür. Modeli çözmek içinse açık kaynak kodlu bir çözücü kullanılmıştır. Tüm programların ders çizelgelerini saniyeler içinde hazırlayan bu KDS kodlama veya optimizasyon bilgisi olmayan son kullanıcılar tarafından da kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır.

Çalışmanın sonraki bölümleri şu şekilde devam etmektedir: İkinci bölümde DÇP'ye ait literatür taraması yer almaktadır. Üçüncü bölümde ise öncelikle problemin tanımı verilmekte ve sonrasında ise bu problem için önerilen KTP modeli yer almaktadır. Oluşturulan KTP'nin KDS'ye dönüştürülme işlemleri ve bu KDS'ye ait bir uygulama dördüncü bölümde yer almaktadır. Beşinci bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Eğitim alanında yer alan çizelgeleme problemi (eğitimsel çizelgeleme problemi) lise çizelgeleme ve üniversite çizelgeleme problemi olarak sınıflandırılmaktadır (Babaei ve diğ., 2015). Üniversite çizelgeleme problemi ise kendi içinde sınav çizelgeleme ve ders çizelgeleme olarak alt gruplara ayrılmaktadır (Babaei ve diğ., 2015; E. Burke ve diğ., 1997). Sınav çizelgeleme problemi (SÇP) sınavların belirli bir zaman aralığında yapılabilmesi için mevcut derslik kaynağını kullanarak sınavların belirli bir gün ve zamanda uygun yerlere/dersliklere atanmasını sağlamaktadır. Sınav programları kurum yapısına bağlı olarak bir yarıyılıda iki ya da üç kez yapılabilmektedir. Ders çizelgeleri ise SÇP'nin aksine her dönemde bir kez olacak şekilde bir akademik yıl içerisinde iki kez oluşturulmaktadır. DÇP bir dönemde takip edilecek haftalık ders programının oluşturulması işlemini kapsamakta ve derslerin haftalık ders programında nerede olacağını ve hangi sınıfta işleneceğinin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu araştırmanın konusunu DÇP oluşturmaktadır.

Yapısı gereği NP-zor sınıfına giren çizelgeleme problemlerinden biri olan DÇP (Burke ve diğ., 1997), kurumdan kuruma farklılık gösteren bir yapıya sahip olduğu için literatürde bu konuyla ilgili çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalarda araştırmacılar, matematiksel modelleme ve sezgisel yöntemleri kullanarak DÇP'yi çözüme kavuşturmuşlardır. Daskalaki ve diğ. (2004) KTP yöntemini kullanarak oluşturdukları DÇP modelini Patras Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü ders çizelgelerinin oluşturulması için kullanmışlardır. Günalay ve Şahin (2006) ise hedef programlama

yöntemini kullanarak Harp Akademisi DÇP için çözüm önerisinde bulunmuşlardır. Lisans eğitim programında yer alan 1. sınıfları kullanarak küçük bir örnek için uygulamasını yaptıkları bu çalışmada KDS geliştirmişlerdir. Schimmelpfeng ve Helber (2007) KTP modeli geliştirmişler ve bu modeli Hannover Üniversitesi İktisat ve İşletme Fakültesi'ne uygulamışlardır. Oluşturdukları bu modeli KDS'ye dönüştürerek üniversitede kullanılmasını sağlamışlardır. Bakır ve Aksop (2008) ise Gazi Üniversitesi İstatistik Bölümü için KTP modeli geliştirerek ders çizelgeleri oluşturmuşlardır. Oladokun ve Badmus (2008) ise yapmış oldukları çalışmada KTP modeli geliştirerek Nijerya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi için ders çizelgeleri oluşturmuşlardır. Miranda (2010) yapmış olduğu çalışmada Şili Üniversitesi'ne ait ders programlarını çizelgeleyebilmek için KTP yöntemini kullanarak ders çizelgelerinin otomatik olarak hazırlandığı "eClasSkedular" adını verdiği bir sistem geliştirmiştir. Al-Qaheri ve arkadaşlarının (2011) yaptığı çalışma ise Kuveyt Üniversitesi İşletme Fakültesi ders çizelgeleme için oluşturdukları KDS'den oluşmaktadır. Atamaların fakülte-ders, ders-zaman aralığı ve zaman aralığı-sınıf atama şeklinde üç aşamalı olarak yapıldığı model tam sayılı hedef programlama yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Miranda ve diğ. (2012) DÇP için KTP yöntemini kullanarak web-tabanlı bir KDS geliştirmişlerdir. Ders ve dersliklerin çizelgelenmesini sağlayan bu sistemi Diego Portales Üniversitesi için kullanmışlardır. Kökçen ve diğ. (2014) geliştirdikleri KTP modelini yurt içinde yer alan bir üniversitenin matematik bölümü için uygulamışlardır. Sánchez-Partida ve arkadaşları (2014) ise KTP modeli geliştirerek UPAEP Üniversitesi DÇP için çözüm elde etmişlerdir. Phillips ve diğ. (2015) yaptıkları çalışma derslere sınıf atamasının yapılması problemini kapsamaktadır. Var olan problem için genel bir yapıya sahip olan ve büyük örnekler için çözülebilir özellikte olan yeni bir model önermişlerdir. Uçar ve diğ. (2015) önermiş oldukları matematiksel programlama modelini Gazi Üniversitesi EM Bölümü ders çizelgelerinin oluşturulması için kullanmışlardır. Altunay ve Eren (2016) geliştirdikleri KTP modelini Uludağ Üniversitesi'ne uygulamaları, Demir ve Çelik (2016) KTP modelini Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ders çizelgelerini oluşturmak için kullanmışlardır. Ertuğrul ve Öztaş (2016) ise KTP programlama modelini Pamukkale Üniversitesi İİBF İşletme Fakültesi ders çizelgelerini oluşturmak için kullanmışlardır. Kamışlı Öztürk ve arkadaşları (2016) ise geliştirdikleri KTP'yi Anadolu Üniversitesi EM Bölümü ders çizelgelerini oluşturmak için kullanmışlardır. 25 dersin yer aldığı planı oluşturmak için derslik kapasitelerini kullandıkları bu çalışmada amaç fonksiyonunun ağırlıklarını belirlemek için analitik serim sürecini kullanmışlardır. Vermuyten ve diğ. (2016) ise iki aşamalı KTP modeli önermişlerdir. İlk aşamada derslerin derslik ve zamanları belirlenirken ikinci aşamada ilk aşamada belirlenen sonuçlara göre derslikler arası geçiş yapan öğrenci sayısı minimize edilmiştir. Dersler arasındaki geçişlerdeki öğrenci sayısını minimize etmeyi amaçladıkları bu çalışmayı KU Leuven Kampüsü Brüksel Ekonomi ve İşletme Fakültesi'ne uygulamışlardır. Fonseca ve diğ. (2017) ise XHSTT (the extended markup language for high school timetabling) problemi için var olan KTP modelini yeniden formüle etmiştir. Eren ve diğ. (2018) ise yapmış oldukları çalışmada KTP model geliştirerek Kırıkkale Üniversitesi EM Bölümü için ders çizelgeleri oluşturmuşlardır. Siddiqui ve arkadaşları (2018) DÇP için geliştirdikleri KTP modelini web tabanlı bir KDS'ye dönüştürmüşler ve üniversitelerinde uygulamışlardır. Çok amaçlı yeni bir model önerdikleri bu çalışmayla ders çizelgelerinin hazırlanmasını sağlamışlardır.

Yukarıda verilen çalışmalar tam sayılı modeller kullanılarak oluşturulan çalışmalardan oluşmaktadır. Ancak bazı durumlarda yöntemleri geliştirerek daha iyi çözümler elde edebilmek için sezgisel yöntemler gibi ek yöntemler geliştirilmiştir. Dimopoulou ve Miliotis (2001) KTP modeli geliştirerek ders ve sınav çizelgelerinin oluşturulabilmesi için bir sistem geliştirmişlerdir. Oluşturdukları ders çizelgelerini, sınav çizelgelerinin başlangıç çözümü olarak kullanmışlardır. Daha iyi sonuçlar elde etmek için ise sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli beş modülden oluşan bir KDS'ye dönüştürmüşlerdir: veri, kontrol sistemi, optimizasyon, rapor üretimi ve değerlendirme. Oluşturulan bu KDS, Atina Ekonomi ve İşletme Üniversitesi'nde uygulanmıştır. Daskalaki ve Birbas (2005) iki aşamalı gevşeme prosedürü (two stage relaxation procedure) kullanarak yeni bir KTP modeli önermişlerdir. Önerdikleri bu çalışmanın ilk aşamasında dersler günlere atanmış, ikinci aşamada ise yeniden düzenleme yapılarak derslerin ardışıklığı garanti altına alınmıştır. Burke ve arkadaşları (2010) ITC için yapmış oldukları çalışmada sezgisel model önerisinde bulunmuşlardır. Modelde yer alan alt problemleri çözmek için ise KTP kullanmışlardır. Lemos

ve diğ. (2019) ise yaptıkları çalışmada iki aşamalı KTP modeli geliştirmişler ve açgözlü algoritma (greedy algortihm) kullanarak çalışmanın performansını garantilemişlerdir. İlk aşamada derslere yerleştirilen öğrenci sayısı maksimize edilmiş ikinci aşamada ise dersliklerin kullanımı optimize edilmiştir.

Matematiksel modeller dışında sadece sezgisel yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Piechowiak ve Kolski (2004) ise Valenciennes ve Hainaut Cambresis Üniversitesi ders çizelgelerinin oluşturulması için interaktif bir sistem geliştirerek KDS oluşturmuşlardır. Yaptıkları bu çalışmanın ilk aşaması kısıt programlama ile oluşturulmakta ve çizelgelerin elde edilmesi işlemini kapsamaktadır. İkinci aşaması ise çoklu ajan yaklaşımları kullanılarak oluşturulan KDS'yi içermektedir. Ateş ve Kestane (2014) yapmış oldukları çalışmada sürükle-bırak teknolojisini kullanarak çakışmaların yer almadığı ders çizelgelerinin oluşturulabilmesi için bir KDS geliştirmişlerdir. Diğer çalışmalardan farklı olarak optimizasyon yöntemi kullanmadan geliştirdikleri bu yazılımı Celal Bayar Üniversitesi Eğitim Fakültesi'ne uygulamışlardır. Abdelhalim ve El Khayat (2016) yapmış oldukları çalışmada genetik algoritma ve veri yakalama yöntemlerini kullanarak DÇP için çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Veri yakalama kısmında Radio-Frequency Indetification (RFID) yönteminden faydalanmışlar ve bu yöntem ile tanımlanan zaman dilimlerinde öğrencilerin numaralarını kullanarak dersliklerin mevcut kapasite kullanımlarını ölçmüşlerdir. Ders çizelgelerinin hazırlandığı bilgisayar ile bağlantılı olan RFID ile sınıf kullanımları parametre olarak tutulmuştur ve ders çizelgelerinin güncellenmesi bu bilgilere göre sağlanmıştır. Böylece kullanılan RFID sistemi sayesinde veri görünürlüğünün (information visibility) temel alındığı dinamik bir yapı oluşturmuşlar ve Alexandra Üniversitesi Ticaret Fakültesi'ne uygulamışlardır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar sezgisel ya da matematiksel yöntemler kullanarak bir kuruma ait ders çizelgelerinin oluşturulması için geliştirilen modelleri içermektedir. DÇP için oluşturulan bu KDS'ler içerisinde Günalay ve Şahin (2006), Schimmelpfeng ve Helber (2007), Miranda (2010), Al-Qaheri ve diğ. (2011), Miranda ve arkadaşları (2012) ve Siddiqui ve arkadaşlarının (2018) yapmış oldukları çalışmalar KTP kullanılarak oluşturulmuştur. Günalay ve Şahin (2006) yapmış oldukları çalışmada KTP kullanarak yaptıkları çalışma için iki modülden oluşan bir KDS geliştirmişler ve geliştirdikleri bu KDS'yi eşit boyutlara sahip sınıfların olduğu modeli çalıştırmak için kullanmışlardır. Schimmelpfeng ve Helber (2007) ise yaptığı çalışmada öğretim elemanlarının isteklerinin yerine getirildiği modeli KDS'ye dönüştürerek otomatik ders çizelgeleme sistemi oluşturmuşlardır. Yapılan bu çalışmalardan biri olan Miranda'nın (2010) yazılım olarak geliştirdiği sistem de ders çizelgelerinin oluşturulması işlemini kapsamaktadır. Al-Qaheri ve arkadaşları (2011) üç aşamalı tam sayılı hedef programlama yöntemini kullanarak oluşturdukları modeli son kullanıcıların kolayca ders çizelgeleri hazırlayabildiği bir KDS'ye dönüştürmüşlerdir. Miranda ve diğ. (2012) yapmış oldukları çalışmada ise sınıflar ve zamanlar belirli bir yapı/desen olarak birleştirilerek bir bütün halinde ele alınmıştır. Derslerde oluşturulan önceden belirlenen bu desenler kullanılarak ders çizelgeleri oluşturulmuştur. Siddiqui ve diğ. (2018) akademik dönem hazırlığı yapmak için kullandıkları web tabanlı KDS'de ise gerekli olan dersler kullanılarak birden fazla mümkün çözüm oluşturarak öğrencilerin uygun programı seçmeleri için örnek çizelgeler oluşturulmuştur. Güler ve Geçici (2020) ise yapmış oldukları çalışmada DÇP'den farklı olarak SÇP'yi ele almışlardır. Bu çalışmada SÇP için geliştirilen KTP modeli KDS'ye dönüştürülerek sınav çizelgeleme işlemlerinin otomatik olarak hazırlanması sürdürülebilir hale getirilmiştir. DÇP ve SÇP de kullanılan girdiler aynı olmasına rağmen problemlerin yapısı gereği farklı matematiksel modeller kullanılmalıdır. Örneğin sınavlar tek bir zaman aralığında yapılıyorken, dersler en az iki zaman aralığı olacak şekilde planlanmaktadır. Buna ilaveten bir sınav için birden fazla derslik kullanılabilir. Yapılan bu çalışmada YTÜ-EM'nin toplamda dokuz adet olan lisans ve lisansüstü programı derslerinin çizelgelenmesi için bir KTP modeli önerilmektedir. Açık kaynak kodlu çözücü CBC kullanılarak çözümlerin elde edildiği bu KDS'de optimal çözümler hızlı bir şekilde oluşturulmaktadır. Çizelge 1, literatürde yer alan ve DÇP'nin ele alındığı çalışmaların özetini göstermektedir.

Çizelge 1. Ders çizelgeleme ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar*Table 1. Studies in the literature on course scheduling*

Yazarlar	Yıl	Uygulanan yöntem	Uygulandığı yer	KDS
Dimopoulou ve Miliotis	2001	KTP + Sezgisel	Atina Ekonomi ve İşletme Üniversitesi	Var
Daskalaki vd.	2004	KTP	Patras Üniversitesi	Yok
Piechowiak ve Kolski	2004	Kısıt programlama + çoklu-ajan yaklaşımları	Valenciennes ve Hainaut Cambresis Üniversitesi	Var
Daskalaki ve Birbas	2005	KTP	---	Yok
Günalay ve Şahin	2006	Hedef programlama	Harp Okulu	Var
Schimmelpfeng ve Helber	2007	KTP	Hannover Üniversitesi İktisat ve İşletme Fakültesi	Var
Bakır ve Aksop	2008	KTP	Gazi Üniversitesi İstatistik Bölümü	Yok
Oladokun ve Badmus	2008	KTP	Nijerya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Yok
Miranda	2010	KTP	Universidad de Chile	Var
Burke vd.	2010	Hibrit sezgisel +KTP	ITC / Udine çizelgeleme problemi (2007)	Yok
Al-Qaheri vd	2011	KTP	Kuveyt Üniversitesi İşletme Fakültesi	Var
Miranda vd.	2012	KTP	Diego Portales Üniversitesi	Var
Ateş ve Kestane	2014	Sürükle bırak teknolojisi	Celal Bayar Üniversitesi Eğitim Fakültesi	Var
Kökçen vd.	2014	KTP	Matematik Bölümü	Yok
Sánchez-Partida vd.	2014	KTP	UPAEP Üniversitesi	Yok
Phillips vd.	2015	KTP	Auckland Üniversitesi + 2007 ITC	Yok
Uçar vd.	2015	Matematiksel programlama	Gazi Üniversitesi EM	Yok
Abdelhalim ve Khayat	2016	Genetik algoritma + veri yakalama (RFID)	Alexandra Üniversitesi Ticaret Fakültesi	Yok
Altunay ve Eren	2016	KTP	Uludağ Üniversitesi	Yok
Demir ve Çelik	2016	KTP	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Yok
Ertuğrul ve Öztaş	2016	KTP	Pamukkale Üniversitesi İİBF İşletme Fakültesi	Yok
Kamuşlu Öztürk vd.	2016	KTP	Anadolu Üniversitesi EM	Yok
Vermuyten vd.	2016	KTP	KU Leuven Kampüsü Brüksel Ekonomi ve İşletme Fakültesi	Yok
Fonseca vd.	2017	KTP	ITC	Yok
Eren vd.	2018	KTP	Kırıkkale Üniversitesi EM	Yok
Siddiqui vd.	2018	KTP	Orta Doğu Üniversitesi	Var
Lemos vd.	2019	KTP + Greedy algoritması	Lizbon Üniversitesi Yüksek Teknik Enstitüsü	Yok
Bu çalışma	2020	KTP	YTU-EM	Var

PROBLEMİN TANIMI VE KTP MODELİ (PROBLEM DEFINITION AND MIP MODEL)

Çalışmanın bu bölümde öncelikle problemin tanımı verilecektir. Daha sonrasında ise mevcut yapı için önerilen KTP modeli anlatılacaktır.

Problemin Tanımı (Problem Definition)

Bu çalışmada YTÜ-EM bölümüne ait ders çizelgelerinin oluşturulması için geliştirilen KDS ele alınmaktadır. Ders çizelgeleme işlemi, müfredatta yer alan derslerin haftanın beş iş gününde olacak şekilde belirli zaman dilimlerine uygun olarak atanmasını sağlamaktadır. YTÜ-EM'ye ait dersler lisans ve lisansüstü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Lisansa ait dersler 1. sınıf, 2. sınıf, 3. sınıf ve 4. sınıf olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflar Türkçe (%30 İngilizce) ve İngilizce (%100 İngilizce) olmak üzere iki programdan oluşmaktadır. Lisansüstü dersleri ise endüstri mühendisliği yüksek lisans, sistem mühendisliği yüksek lisans, mühendislik yönetimi yüksek lisans, endüstri mühendisliği doktora, iş güvenliği doktora programı ve iki adet tezsiz program olmak üzere toplam yedi programdan oluşmaktadır. Lisansüstü programlardan bazıları 2. öğretim olarak veriliyorken lisans programı sadece 1. öğretim programı olarak verilmektedir. Bu derslerin atamasının yapılabilmesi için YTÜ-EM'nin sahip olduğu altı derslik kullanılmaktadır. Çalışmanın bundan sonrasında fiziksel olarak kullanılan sınıfları tanımlamak için *derslik*, öğrencilerin eğitim sürelerini tanımlamak için de *sınıf* (örn. 3. sınıf gibi) tanımı kullanılacaktır. Lisans derslerin çizelgelenmesi için beş derslik kullanılabiliyorken lisansüstü dersleri altı dersliğin hepsi kullanılarak çizelgelenmektedir. Çizelgede yer alan bu dersler bölümde yer alan 21 öğretim elemanı ve dışarıdan gelen misafir öğretim elemanları tarafından verilmektedir. Ders çizelgeleri oluştururken takip edilmesi gereken kurallar şu şekilde verilebilir:

- Lisans dersleri 1. öğretim programı için tanımlı zaman dilimlerine atanmalıdır. Lisansüstü dersleri ise programlara göre 1. öğretim ve 2. öğretim zamanlarına uygun olacak şekilde atanmalıdır.
- Dersler iki veya üç saatlik zaman aralıklarından oluşmaktadır ve her ders sahip olduğu zaman aralığı kadar süreye atanmalıdır.
- Ders çizelgelerinin oluşturulması aşamasında derslere kayıtlı olan öğrencilerin sayısı kesin olarak bilinmemektedir. Bu nedenle ders çizelgeleri EM'deki programlar için tanımlanan müfredatlarda yer alan sınıf tanımlamaları dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Örneğin lisans seviyesinde yer alan programlar için dersler 1. sınıf, 2. sınıf, 3. sınıf ve 4. sınıflar olacak şekilde tanımlanmaktadır.
- Aynı sınıfa ait olan dersler çakıştırılmamalıdır. Örneğin 3. sınıfa ait olan Yapay Zekâ ve Uzman Sistemler (END3971) dersi ile Yöneylem Araştırması 2 (END3991) dersi çakıştırılmamalıdır.
- Lisans programında yer alan dersler Türkçe ve İngilizce olarak sınıflandırıldığı için müfredatta yer alan dersler Türkçe ve İngilizce olacak şekilde en az iki grup olarak açılmaktadır. Bu dersler farklı öğretim elemanları tarafından verilebildiği gibi aynı öğretim elemanı tarafından da verilebilmektedir. Eğer dersler aynı öğretim elemanı tarafından veriliyorsa dersler farklı zamanlarda olmalıdır.
- Lisans programında yer alan bazı dersler (örneğin birden fazla grup olarak açılan farklı öğretim elemanları tarafından verilen ders) aynı zaman dilimlerinde yapılmak istenmektedir. Bu şekilde belirtilen ve aynı anda olması istenen dersler aynı zamanlara yazılmalıdır.
- Son yıllarda 3. ve 4. sınıf öğrencilerinden uzun dönemli staj yapan veya yarı zamanlı çalışan sayısı oldukça artmaya başlamıştır. Bunun neticesinde özellikle farklı günlere yayılan ders seçimlerinde gözle görülen bir biçimde düşüş görülmüş ve öğrenciler tarafından konu ile ilgili bir düzenleme yapılması yoğun olarak dile getirilmiştir. Bu nedenle derslerin belirli günlerde toplanması da modele bir kısıt olarak eklenmiştir.

KTP Modeli (MIP Model)

Bu bölümde ise problemi çözebilmek için önerilen KTP modeli yer almaktadır. Modelin oluşturulması için gerekli olan küme, indis ve parametreler sırasıyla Çizelge 2, Çizelge 3 ve Çizelge 4'te sunuluyorken değişkenler Çizelge 5'te verilmektedir.

Bölüm kuralları, bölümün sahip olduğu özellikler ve öğretim elemanlarına ait istekler kullanılarak oluşturulan kısıtlar KTP modelinin tanımlanması için kullanılmıştır. Modelde yer alan kısıtları tanımlayabilmek için X_{idt} ve Y_{rd} değişkeni kullanılmaktadır. Bu değişkenler sayesinde dersler belirli bir gün ve zaman aralığına atanabilmektedir. X_{idt} değişkeni, i dersinin d gün ve t zaman aralığına atanmasını sağlarken Y_{rd} değişkeni r sınıfında yer alan öğrencilere ait derslerin belirli günlerde toplanmasını sağlamaktadır. r indisi ile lisans programındaki dört adet sınıf ile yedi adet lisansüstü programın birleşiminden oluşan 11 adet farklı eğitim müfredat yılı gösterilmektedir. Z_{dt}^1 ve Z_{dt}^2 ise sapma değişkenleri olarak tanımlanmaktadır ve dersler için dersliklerin yetersiz geldiği durumlarda kullanılmaktadır.

Çizelge 2. Kümeler

Table 2. The sets

Küme	Tanımı
I	Dersler kümesi.
D	Günler kümesi.
T	Zaman aralıkları kümesi.
R	Programlarda yer alan dört adet lisans sınıfları ile yedi adet lisansüstü programlarının birleşim kümesi.
H	Öğretim elemanları kümesi.
I_U	Lisans dönemine ait dersler kümesi.
I_G	Lisansüstü dönemine ait dersler kümesi.
I_{D1}	Derslikte gerçekleşen dersler kümesi.
I_{D2}	Laboratuvarda gerçekleşen dersler kümesi.
I_{S2}	İki saat süren dersler kümesi.
I_{S3}	Üç saat süren dersler kümesi.
I_r	r sınıfına ait olan dersler kümesi.
I_h	h öğretim elemanı tarafından verilen dersler kümesi.
I_{P1}	Birinci öğretim dersleri.
I_{P2}	İkinci öğretim dersleri.
γ_1	Aynı anda yapılması istenen dersler kümesi. Eğer $(i, i') \in \gamma_1$ ise i dersi ile i' dersi aynı zaman diliminde yapılır.
γ_2	Aynı günde yapılması istenen dersler kümesi. Eğer $(i, i') \in \gamma_2$ ise i dersi ile i' aynı günde yapılır.
α_0	Ders-zaman eşleşmelerinde r sınıfına ait istenmeyen zamanı gösterir küme. Eğer $(r, d, t) \in \alpha_0$ ise r sınıfına ait dersler d gününde ve t zaman aralığında yapılmaz.
α_1	Ders-zaman eşleşmelerinde istenmeyen zamanı gösterir küme. Eğer $(i, d, t) \in \alpha_1$ ise i dersi d gününde t zamanında yapılmaz.
α_2	Ders-zaman eşleşmelerinde istenen zamanı gösterir küme. Eğer $(i, d, t) \in \alpha_2$ ise i dersi d gününde t zamanında yapılır.
T_{P1}	Birinci öğretim programları için zaman aralıkları kümesi.
T_{P2}	İkinci öğretim programları için zaman aralıkları kümesi.

Çizelge 3. İndisler

Table 3. The indices

İndis	Tanımı
i, i'	Ders indisleri
d	Gün indisi
t	Zaman aralığı indisi
r	Sınıf indisi
h	Öğretim elemanı indisi

Çizelge 4. Parametreler

Table 4. The parameters

Parametre	Tanım
M	Büyük bir sayı
w_i	i dersinin süresi (iki saatlik dersler için 2, üç saatlik dersler için 3)
c_{dt}^1, c_{dt}^2	Sapma değişkenlerine ait ceza maliyetleri
k_{idt}	Lisans derslerinin belirlenen zaman aralığındaki son saatlere yazılmasını engellemek için tanımlanan ceza maliyeti

Çizelge 5. Değişkenler

Table 5. The variables

Değişken	Tanımı
X_{idt}	i dersi d günü ve t zaman aralığına atanırsa 1, aksi takdirde 0
Y_{rd}	r sınıfına d günü ders atanırsa 1, aksi takdirde 0
Z_{dt}^1, Z_{dt}^2	Sapma değişkenleri

$$\text{Min } z = \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (c_{dt}^1 Z_{dt}^1 + c_{dt}^2 Z_{dt}^2) + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t=8}^{10} k_{idt} X_{idt} \quad (1)$$

Mevcut durumda derslik sayısı kapasitesi göz önüne alınmadan çizelgeler oluşturulduğu için diğer bölümlerin dersliklerinin de kullanıldığı dönemler olmaktadır. Bu nedenle modelde diğer bölümlerden derslik almaya izin verilmekte ancak alınacak derslik sayısı (1) numaralı eşitlikte verilen amaç fonksiyonunun ilk parçasında minimize edilmektedir. Amaç fonksiyonunun ikinci parçası ise 1. öğretimde yer alan derslerin mümkün olduğunca geç vakitlere atanmasını engellemektedir. Amaç fonksiyonunda sırasıyla c_{dt}^1, c_{dt}^2 ve k_{idt} olarak tanımlanan katsayı değerleri aynı kabul edilmiştir. Ancak kullanılan bu parametre değerlerinin belirtilen indis değerlerine göre farklı tanımlanabileceğini göstermek amacıyla modelde c_{dt}^1, c_{dt}^2 ve k_{idt} olarak ifade edilmiştir.

Müfredatta yer alan her bir ders, kendi için tanımlanan süreyi tamamlayacak şekilde oluşturulmalıdır. Derslerin sahip olduğu süre kadar zamana dersi atamak için kısıt (2) kullanılmaktadır. Sınıflara göre ayrılan dersler aynı zaman dilimi içinde yazılamaz, başka bir deyişle aynı sınıftaki öğrencilerin dersleri çakıştırılmaz. Bu çakışmayı engellemek için kısıt (3) kullanılmaktadır. Lisans programlarında ilk sınıflarda servis dersleri olarak adlandırılan temel dersler (matematik, fizik, kimya, vs.) verilmektedir. Bu sınıfların derslerinin servis dersleri ile çakışmaması gerekmektedir. Bu gibi atamaları engellemek için kısıt (4) kullanılmaktadır. Lisans eğitimi sadece 1. öğretim olarak verilirken lisansüstü eğitimi 1. öğretim ve 2. öğretim olarak devam etmektedir. Bu nedenle çizelge oluşturulurken zaman dilimleri 2. öğretim derslerinin biteceği zaman dilimine kadar devam etmektedir. Böyle durumlarda 1. öğretim derslerinin 2. öğretim zaman dilimine yazılmasını engellemek için kısıt (5) kullanılmaktadır. 2. öğretim programları ise 1. öğretim derslerinin yazıldığı zaman aralıklarına atanmamalıdır. Bunun için kısıt (6) kullanılmaktadır. Bazı dersler ise içerikleri benzer olduğu için ya da seçmeli grubuna ait olduğu için paralel zamanlarda yazılmak istenmektedir. Bu şekilde tanımlanan derslerin bir arada yazılabilmesi için kısıt (7) kullanılmaktadır.

$$\sum_d \sum_t X_{idt} = w_i \quad i \in I \quad (2)$$

$$X_{idt} + X_{i'dt} \leq 1 \quad r \in R, i \in I_r, i' \in I_r, d \in D, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_r} X_{idt} = 0 \quad r \in R, d \in D, t \in T \text{ st. } (r, d, t) \in \alpha_0 \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T_{P_2}} X_{idt} = 0 \quad i \in I_{P_1}, d \in D \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T_{P_1}} X_{idt} = 0 \quad i \in I_{P_2}, d \in D \quad (6)$$

$$X_{idt} - X_{i'dt} = 0 \quad (i, i') \in \gamma_1, d \in D, t \in T \quad (7)$$

Bölümde yer alan öğretim elemanı sayısı 21 ve müfredatta yer alan ders sayısı 80'e yakın olduğu için çoğu öğretim elemanının bir dönemde verdiği ders sayısı en az iki olmaktadır. Ayrıca lisans seviyesindeki derslere ilaveten öğretim elemanları lisansüstü dersleri de verebilmektedir. Bu nedenle birden fazla ders veren öğretim elemanlarının derslerinin aynı zaman diliminde olmaması kısıt (8) ile sağlanmaktadır. Öğretim elemanlarının tercihlerine bağlı olarak bazı derslerin aynı gün içerisinde yapılması istenebilir. Böyle dersleri aynı güne yazmak için kısıt (9) kullanılmaktadır. Öğretim elemanlarının isteklerine bağlı olarak derslerin istemedikleri zamanlarda derslerinin olmasını engellemek veya istedikleri zamanlara yazılmasını sağlamak için sırasıyla kısıt (10) ve kısıt (11) kullanılmaktadır.

$$X_{idt} + X_{i'dt} \leq 1 \quad h \in H, i \in I_h, i' \in I_h, d \in D, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} \left(\frac{X_{idt}}{w_i} - \frac{X_{i'dt}}{w_{i'}} \right) = 0 \quad i \in I, i' \in I, st. (i, i') \in \gamma_2, d \in D \quad (9)$$

$$X_{idt} = 0 \quad i \in I, d \in D, t \in T \text{ st. } (i, d, t) \in \alpha_1 \quad (10)$$

$$X_{idt} = 1 \quad i \in I, d \in D, t \in T \text{ st. } (i, d, t) \in \alpha_2 \quad (11)$$

İki saatlik derslerin (örneğin seçmeli dersler) zaman aralıklarının peş peşe yazılmasını sağlamak için kısıt (12)-(14) kullanılmaktadır. Model eğer iki saat süren bir ders için herhangi bir t anına ders atarsa (12) numaralı kısıt, bu saatin ya bir saat öncesine ($t - 1$) ya da takip eden saate ($t + 1$) ders ataması yapmaktadır. Örneğin ikinci saate bir atama yapılırsa bu kısıt ya birinci saate ya da üçüncü saate mutlaka bir atama yapacaktır. Dolayısıyla bu kısıtın iki saatlik derslerde sağlanabilmesi için atanan ders saatlerinin ardışık olması gerekir.

$$X_{idt} \leq X_{idt-1} + X_{idt+1} \quad i \in I_{S2}, d \in D, 2 \leq t \leq 12 \quad (12)$$

$$X_{idt} - X_{idt+1} \leq 0 \quad i \in I_{S2}, d \in D, t = 1 \quad (13)$$

$$X_{idt} - X_{idt-1} \leq 0 \quad i \in I_{S2}, d \in D, t = 13 \quad (14)$$

Bölümde yer alan zorunlu dersler olarak tanımlanan Yöneylem Araştırması, İstatistik gibi temel bölüm dersleri ise üç saatlik ders olarak tanımlanmaktadır. Bu derslerin peş peşe yazılmasını sağlamak için kısıt (15)-(17) kullanılmaktadır.

$$X_{idt} \leq X_{idt-1} + X_{idt+2} \quad i \in I_{S3}, d \in D, 2 \leq t \leq 11 \quad (15)$$

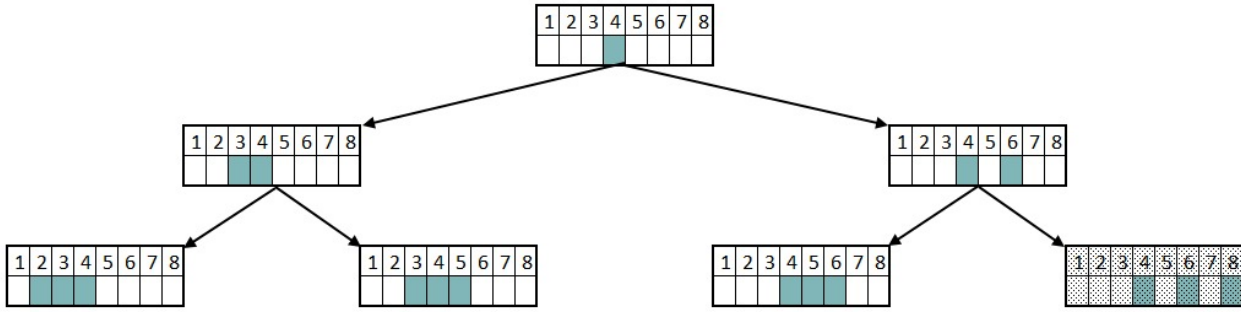
$$X_{idt} - X_{idt+2} \leq 0 \quad i \in I_{S3}, d \in D, t = 1 \quad (16)$$

$$-X_{idt-1} + X_{idt} \leq 0 \quad i \in I_{S3}, d \in D, t = 13 \quad (17)$$

Model eğer üç saat süren bir ders için herhangi bir t anına ders atarsa (15) numaralı kısıt, bu saatin ya bir saat öncesine ($t - 1$) ya da takip eden ikinci saate ($t + 2$) ders ataması yapmaktadır. Örneğin dördüncü saate bir atama yapılırsa bu kısıt ya üçüncü saate ya da altıncı saate mutlaka bir atama yapacaktır.

a. Üçüncü saate atama yapıldığını varsayalım. Bu durumda (15) numaralı kısıt üçüncü saat için yazıldığında ya ikinci saate ya da beşinci saate atama yapacaktır. İkinci saate atama yapıldığında dördüncü saate ders olduğu için (15) numaralı kısıt ikinci saat için sağlanmış olacaktır. Bu durumda ders (2, 3, 4) numaralı saatlerde olacaktır. Ders beşinci saate atandığında (15) numaralı kısıt üçüncü saate ders olduğu beşinci saat için sağlanmış olacaktır. Bu durumda ders (3, 4, 5) numaralı saatlere atanacaktır.

b. Altıncı saate atama yapıldığını varsayalım. Bu durumda (15) numaralı kısıt altıncı saat için yazıldığında ya beşinci saate ya da sekizinci saate atama yapacaktır. Beşinci saate atama yapıldığında dördüncü saatte ders olduğu için (15) numaralı kısıt sağlanmış olacaktır. Bu durumda ders (4, 5, 6) numaralı saatlerde olacaktır. Sekizinci saat için (15) numaralı kısıt sağlanamayacağı için (yedinci veya onuncu saatte ders yok), bu aşamada ders ataması yapılamayacaktır. Bu örneğin akışı Şekil 1’de verilmiştir



Şekil 1. Kısıt (15)'in çalışma yapısı örneği
Figure 1. Example of the working structure of constraint (15)

Lisans ve lisansüstü derslerin dersliklere atanmasını sağlamak için kısıt (18)-(20) kullanılmaktadır. Lisans programının kullanabildiği toplam beş derslik bulunmaktadır. Bu nedenle lisansa ait dersler bir zaman aralığında en fazla beş tane olacak şekilde oluşturulabilir. Ancak beş dersliğin eksik kaldığı durumlarda diğer bölümlerden derslik alınabilmektedir. Lisans derslerinin dersliklere atanması kısıt (18) ile sağlanmakta ve diğer bölümlerden alınabilecek derslik sayısı sapma değişkeni ile ifade edilmektedir. Bu sapma değişkeni amaç fonksiyonunda en-küçüklenerek diğer bölümlerden alınan derslik sayısı minimize edilecektir. Bazı dersler laboratuvar dersliklerinde yapılmaktadır. Bu nedenle bu dersler kısıt (19) kullanılarak laboratuvar dersliklerine atanmaktadır. Lisansüstü dersleri için ayrılmış özel bir sınıf bulunmaktadır. Dolayısıyla lisansüstü dersleri için beş dersliğe ek olarak bir derslik daha kullanabilmektedir. Ancak kullanılan dersliklerde lisans ve lisansüstü derslerinin çakışmaması gerekmektedir. Bu nedenle dersliklerdeki toplam ders sayısının altıyı geçmemesi gerekir. Bu durum kısıt (20) kullanılarak sağlanmaktadır. Lisans dersleri için diğer bölümlerden de derslik alınabileceği için bu kısıtlar sapma değişkeni kullanılarak gevşek kısıt olarak yazılmıştır.

$$\sum_{i \in (I_U \cap I_{D_1})} X_{idt} \leq 5 + Z_{dt}^1 \quad d \in D, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{i \in (I \cap I_{D_2})} X_{idt} \leq 2 \quad d \in D, t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{i \in (I_U \cap I_{D_1})} X_{idt} + \sum_{i \in (I_G \cap I_{D_1})} X_{idt} \leq 6 + Z_{dt}^2 \quad d \in D, t \in T \quad (20)$$

Son yıllarda tüm endüstri mühendisliği lisans programlarında yeni bir akım başlamıştır. Üçüncü ve dördüncü sınıf öğrencileri, özellikle son yıllarda uzun dönem staj yaparak iş hayatına hazırlanmak istemektedirler. Derslerin farklı günlere yayılmış olması bu açıdan problem teşkil etmektedir. Öğrenciler ya derslere gelmemekte ya da staj yapamamaktadırlar. Bu akımın giderek güçlenmesi nedeniyle derslere gelmeyen öğrenci sayısı artmış ve dolayısıyla hem öğrencilerden hem öğretim elemanlarından konuyla ilgili düzenleme istekleri gündeme gelmiştir. Öğrencilerin genel isteği en az iki günün boş kalması yönündedir. Y_{rd} değişkeni r sınıfında okuyan öğrencilerin d gününde dersinin olup olmadığını gösterir. Kısıt (21) ile bu değişkenin toplamı üçe sabitlenerek öğrencilerin iki gününün boş kalması sağlanmıştır. Kısıt (22)-(23) ise Y_{rd} değişkeninin X_{idt} ile olan bağlantısını sağlamaktadır.

$$\sum_{d \in D} Y_{rd} = 3 \quad r \in \{3, 4\} \quad (21)$$

$$\sum_{i \in I_r} \sum_{t \in T} X_{idt} \leq M Y_{rd} \quad r \in \{3, 4\}, d \in D \quad (22)$$

$$Y_{rd} \leq \sum_{i \in I_r} \sum_{t \in T} X_{idt} \quad r \in \{3, 4\}, d \in D \quad (23)$$

Modelde yer alan değişkenlerin pozitif değerler almasını sağlayan kısıt ise kısıt (24)'tür.

$$X_{idt}, Y_{rd}, Z_{dt}^1, Z_{dt}^2 \in \{0, 1\} \quad i \in I, d \in D, t \in T, r \in R \quad (24)$$

KDS UYGULAMASI (IMPLEMENTATION OF THE DSS)

Çalışmanın bu bölümünde KTP ile kullanarak elde edilen KDS'yi oluşturma basamakları ve KDS kullanılarak hazırlanan 2019-2020 güz dönemine ait ders çizelgesi verilecektir.

Bu çalışmanın amacı oluşturması uzun zaman alan DÇP için bir KDS oluşturarak öğretim elemanı ve öğrencilerin isteklerine uygun ders çizelgelerinin hızlı bir şekilde elde edilmesini sağlamaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için önerilen KTP, MS Excel'in bir eklentisi olan Solver Studio kullanılarak oluşturulmuştur. Bu eklenti içinde programı kodlamak için Python programlama dili ve modeli çözmek için ise CBC açık kaynak kodlu çözücü kullanılmıştır.

KDS'nin çalıştırılabilmesi için öncelikle parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Parametrelerin tanımlanabilmesi için modelin kodlanması aşamasında girdi alanları oluşturularak modelin çözümünde kullanılacak tüm listeler MS Excel çalışma sayfalarında tablo olarak oluşturulmaktadır. Modelde kullanılan parametrelerin tanımlanması için oluşturulan girdi alanlarını göstermek amacıyla KDS'ye ait ekran görüntüleri kullanılacaktır (Ders sayısının fazla olduğu bu uygulamada fikir oluşturabilmek adına girdi ve çıktı alanları için kullanılan parametrelerin bir kısmı verilmiştir). Derslere ait kümelerin tanımlanması için oluşturulan girdi alanlarına ait KDS arayüzü ise Şekil 2'de yer almaktadır. MS Excel çalışma sayfasına tanımlanan girdi alanları gibi çıktı alanları da çalışma sayfaları (sekme/sheet) kullanılarak oluşturulmakta ve modelin çalıştırılması sonucu elde edilen çıktılar bu sayfaya yazdırılmaktadır.

Ders İle İlgili Bilgiler											L+LU			L+LU		
Dersler I	Ders isimleri I	Açılan Dersler	I_0/I_g	I_{p1}/I_{p2}	I_r	w_i (I_{s2}/I_{s3})	I_{D1}	I_{D1}	I_{D2}	I_{D2}	γ_1 Hazırlık	γ_1				
			0	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	0	1	
1	END1902 Bilgisayar Destekli Teknik Resim Gr1	1	1	1	1	3	0	0	0	1	0	1	2	1	5	6
2	END1902 Bilgisayar Destekli Teknik Resim Gr2	1	1	1	1	3	0	0	0	1	1	3	4	2	19	20
3	END1912 İş Sağlığı ve Güvenliği 2 Gr1	1	1	1	1	3	1	0	0	0	2	5	6	3	21	22
4	END1912 İş Sağlığı ve Güvenliği 2 Gr2	1	1	1	1	3	1	0	0	0	3	7	8	4	30	31
5	END2972 Yöneylem Araştırması 1 Gr1	1	1	1	2	3	1	0	0	0	4	11	12	5	36	37
6	END2972 Yöneylem Araştırması 1 Gr1	1	1	1	2	3	1	0	0	0	5	19	20	6	23	27
7	END2962 Nümerik Analiz Gr1	1	1	1	2	3	1	0	0	0	6	21	22	7	28	29
8	END2962 Nümerik Analiz Gr2	1	1	1	2	3	1	0	0	0	7	24	25	8	18	26
9	END2312 Ergonomi Gr1	1	1	1	2	3	1	0	0	0	8	30	31	9	34	39
10	END2312 Ergonomi Gr2	1	1	1	2	3	1	0	0	0	9	36	37	10	32	33
11	END2992 İstatistik Gr1	1	1	1	2	3	1	0	0	0	10	28	29	11	35	38
12	END2992 İstatistik Gr2	1	1	1	2	3	1	0	0	0	11	35	38	12	3	4
13	END2982 Üretim Sistemleri Gr1	1	1	1	2	3	1	0	0	0	12	32	33	13	1	2
14	END2982 Üretim Sistemleri Gr2	1	1	1	2	3	1	0	0	0						
15	END3952 Tedarik Zinciri ve Lojistik Yönetimi G	1	1	1	3	3	1	0	0	0						
16	END3952 Tedarik Zinciri ve Lojistik Yönetimi G	1	1	1	3	3	1	0	0	0						
17	END3850 Karar Teorisi	1	1	1	3	2	1	0	0	0						
18	END3850 Karar Teorisi	1	1	1	3	2	1	0	0	0						

Şekil 2. Dersleri tanımlamak için gerekli olan girdi alanları

Figure 2. Necessary input areas to define courses

Ders \ Gün	İstenen Zaman Aralıkları					İstenmeyen Zaman Aralıkları			α_1				α_2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	i	d	t	w_i	i	d	t	w_i	
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	3	0	1	2	3	
2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	6	1	1	3				
3	0	0	0	0	0	1	0	0	1	6	1	2	3				
4	0	0	0	0	0	1	0	0	2	50	1	1	3				
5	0	0	0	0	0	1	0	0	3	50	1	2	3				
6	0	0	0	0	0	1	0	0									
7	0	0	0	0	0	1	0	0									
8	0	0	0	0	0	1	0	0									
9	0	0	0	0	0	1	0	0									
10	0	0	0	0	0	1	0	0									
11	0	0	0	0	0	1	0	0									
12	0	0	0	0	0	1	0	0									
13	0	0	0	0	0	1	0	0									
14	0	0	0	0	0	1	0	0									
15	0	0	0	0	0	1	0	0									
16	0	0	0	0	0	1	0	0									
17	0	0	0	0	0	1	0	0									
18	0	0	0	0	0	1	0	0									
19	0	0	0	0	0	1	0	0									

Şekil 4. İstenen ve istenmeyen zaman aralıklarının tanımlandığı girdi alanları

Figure 4. Input fields where desired and undesired time intervals are defined

Öğretim elemanlarının istekleri doğrultusunda bazı dersler belirli gün ya da zaman aralıklarında yapılmak istenebilir. Bu duruma ilaveten bazı günler ya da zaman aralıkları öğretim elemanları tarafından tercih edilmeyebilir. Bu durumlarda istenen zamanlar ya da tercih edilmeyen zamanları tanımlamak için Şekil 4'te yer alan listeler kullanılmaktadır. Burada yer alan istenmeyen günler kümesi tercih edilmeyen günleri göstermekte ve ders ile gün kesişimine 1 yazılarak belirtilmektedir. Aynı şekilde istenen günler listesinde yer alan ders gün kesişimine 1 yazıldığında ise istenen günler belirtilmektedir. İstenmeyen zaman aralıkları ve istenen zaman aralıkları listeleri de ders zaman aralığı kesişimine 1 yazılarak tanımlanmaktadır. α_1 ve α_2 ile belirtilen girdi alanları ise sırayla derslerin yapılmak istenmediği ve yapılmak istendiği zamanları tanımlamak için kullanılmaktadır.

KDS'yi çalıştırmak için 4 GB RAM'a sahip olan ve Intel® Core™ i5-3470 CPU işlemcili bilgisayar kullanılmıştır. Oluşturulan bu KDS kullanılarak 2019-2020 eğitim yılı güz dönemi ders programını hazırlanmıştır. Güz döneminde lisans programı müfredatında yer alan 25 ders sayısı, artan ders grup sayısına bağlı olarak toplam 43 ders olarak açılmıştır. Lisansüstü dersleri ise 1. öğretim ve 2. öğretim olacak şekilde toplamda 30 ders açılmıştır. Bu derslere tezsiz lisansüstü programları da eklendiğinde güz için açılan toplam ders sayısı 79'dur. Güz döneminde programlara ait olan bilgiler Çizelge 6'da yer almaktadır.

Çizelge 6. Program bilgileri*Table 6. Program informations*

No	Program	Program türü	Öğretim türü	Ders sayısı
1	Endüstri Mühendisliği (Türkçe Program + İngilizce Program)	Lisans	1.Öğretim	43
2	Endüstri Mühendisliği	Yüksek Lisans	1.Öğretim	7
3	Sistem Mühendisliği	Yüksek Lisans	1.Öğretim	7
4	Endüstri Mühendisliği	Doktora	1.Öğretim	4
5	Endüstri Mühendisliği	Yüksek Lisans	2.Öğretim	5
6	Mühendislik Yönetimi	Yüksek Lisans	2.Öğretim	5
7	İş Sağlığı ve Güvenliği	Doktora	1.Öğretim	2
8	İş Sağlığı ve Güvenliği	Tezsiz Yüksek Lisans	2.Öğretim	6
Toplam Ders Sayısı				79

KDS'yi kullanarak optimal olarak elde edilen ders çizelgesinin bir bölümü Çizelge 7 ve Çizelge 8'de yer almaktadır. Çizelge 7 ders programında yer alan bir gün için tüm programlara ait programı ifade ediyorken Çizelge 8'de lisans programlarında yer alan 4. sınıfların haftalık programını göstermektedir. KDS kullanılarak bir dakikadan kısa sürede oluşturulan güz dönemi ders çizelgesinde bölüm dışından alınarak kullanılan derslik sayısı sıfıra indirilmiştir. Bununla birlikte 1. öğretim programında yer alan dersler manuel olarak hazırlanan çizelgeye göre daha erken bitmektedir. Manuel olarak oluşturulan çizelge ile KDS ile oluşturulan çizelge için elde edilen sonuçların karşılaştırması Çizelge 9'da yer almaktadır. Elde edilen diğer kazanımlar ise şu şekilde sıralanabilir: (i) KDS sayesinde ders çizelgesi hazırlamak için gerekli olan bilgi kayıtlı hale getirilerek bilgi kayıplarının önüne geçilmiştir. Böylece çizelgeyi hazırlayan kişi değişse bile KDS sayesinde kolayca elde edilebilmektedir. (ii) Oluşturulan KDS sayesinde gerekli bilgiler temel bilgisayar bilgisine sahip olan kişiler tarafından sisteme kolayca girilebilmekte ve elde edilen çıktılar MS Excel çalışma sayfalarından kolayca okunabilmektedir. (iii) Bilgiler kayıtlı olduğu için oluşturulan sistem sayesinde aynı standartlara sahip çizelgeler elde edilebilmektedir. (iv) Oluşturulan matematiksel model sayesinde en uygun çözümler saniyeler içinde elde edilebilmektedir. (v) Lisans programı son sınıflarında yer alan öğrencilerin programlarında belirli günler boşaltılarak staj için kolaylık sağlamaktadır.

Çizelge 7. Tüm programlar için pazartesi gününe ait ders çizelgesi*Table 7. Course schedule of the monday for all programs*

Saat\Derslik	1.derslik	2.derslik	3.derslik	4.derslik	5.derslik	6.derslik
09.00-10.00	END2312 Gr1	Servis dersleri için kullanılmaktadır			Servis dersleri için kullanılmaktadır	
10.00-11.00	END2312 Gr1				END5020	
11.00-12.00	END2312 Gr1					
12.00-13.00	END1912 Gr1	END1912 Gr2	END4390	END4480	END5020	
13.00-14.00	END1912 Gr1	END1912 Gr2	END4390	END4480	END5020	
14.00-15.00	END1912 Gr1	END1912 Gr2	END2312 Gr1	END5200	END6325	
15.00-16.00	END4890	END4680	END2312 Gr1	END5200	END6325	
16.00-17.00	END4890	END4680	END2312 Gr1	END5200	END6325	
17.00-18.00						
18.00-19.00						
19.00-20.00	END5200	END5020	END5310			
20.00-21.00	END5200	END5020	END5310			
21.00-22.00	END5200	END5020	END5310			

Çizelge 8. 4.sınıflara ait ders programı

Table 8. Course schedule of the 4th class

Saat\Gün	Pazartesi		Salı	Çarşamba	Perşembe		Cuma	
09.00-10.00							END4982 Gr1	END4982 Gr2
10.00-11.00							END4982 Gr1	END4982 Gr2
11.00-12.00					END4992 Gr1	END4992 Gr2	END4982 Gr1	END4982 Gr2
12.00-13.00	END4390	END4480			END4992 Gr1	END4992 Gr2		
13.00-14.00	END4390	END4480			END4992 Gr1	END4992 Gr2	END4690	END4820
14.00-15.00							END4690	END4820
15.00-16.00	END4890	END4680						
16.00-17.00	END4890	END4680						

Çizelge 9. Manuel ve KDS ile oluşturulan çizelgelerin karşılaştırılması

Table 9. Comparison of the schedules created by manual and decision support system

Açıklama	Manuel olarak oluşturulan çizelge	KDS ile oluşturulan çizelge
Çizelgenin oluşturulma süresi	>1 hafta	< 1 dakika
Bölüm dışından temin edilen derslik sayısı	7	0
Akşam saatlerine yazılan ders sayısı (1.öğretim için)	4	0
Lisans son sınıflarda boş bırakılan gün sayısı:		
3. sınıflar	1	2
4. sınıflar	1	2

SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMASI (CONCLUSION AND FUTURE WORKS)

Bu çalışmada YTÜ-EM Bölümü'ne ait ders çizelgeleri ele alınmıştır. Kullanılan derslik sayısının az olması ve artan öğrenci sayısına bağlı olarak artan ders sayısı ile birlikte müfredatın değişmesiyle ders çizelgelerinin elle oluşturulması oldukça zor olmaktadır. Son dönemlerde son sınıflarda yer alan öğrencilerin uzun dönemli stajlarda yer almak için ders programlarında günleri boşaltmaya çalışmak istemesi ile de problem daha da zor bir hale gelmiştir. YTÜ-EM'ye ait DÇP için bir KTP modeli önerilmiştir ve bu modelin açık kaynak kodlu bir çözücü ile çözebilen bir KDS geliştirilmiştir. Bu KDS sayesinde bölümün kurallarına ve öğretim elemanlarının isteklerine uygun ders çizelgeleri kısa sürede optimal olarak elde edilmektedir. Gelecek çalışmalarda amacımız bu sistemi web-tabanlı bir yapı haline getirerek aynı probleme sahip olan kurumların kolayca erişebileceği bir sisteme dönüştürebilmektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)


- Abdelhalim, E. A., & El Khayat, G. A., 2016, An information visibility-based university timetabling for efficient use of learning spaces (IVUT), *Egyptian Informatics Journal*, 17(3), 315–325.
- Al-Qaheri, H., Hasan, M. K., & Al-Husain, R., 2011, A decision support system for a three-stage university course scheduler with an application to College of Business Administration, Kuwait University, *International Journal of Data Analysis and Information Systems*, 3(2), 95–110.
- Altunay, H., & Eren, T., 2016, Ders programı çizelgeleme problemi için 0-1 tamsayılı programlama modeli ve bir örnek uygulama, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(2), 473–488.
- Ateş, A. M., & Kestane, Ö., 2014, Üniversiteler için haftalık ders programı hazırlama yazılımı, *SDU Teknik*

- Bilimler Dergisi*, 4(2), 1–11.
- Babaei, H., Karimpour, J., & Hadidi, A., 2015, A survey of approaches for university course timetabling problem, *Computers & Industrial Engineering*, 86, 43–49. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2014.11.010>.
- Bakır, M. A., & Aksop, C., 2008, A 0-1 integer programming approach to a university timetabling problem, *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 37(1), 41–55.
- Burke, E., Jackson, K., Kingston, J. H., & Weare, R., 1997, Automated university timetabling: The state of the art, *The Computer Journal*, 40(9), 565–571.
- Burke, E. K., Marecek, J., Parkes, A. J., & Rudova, H., 2010, Decomposition, reformulation, and diving in university course timetabling, *Computers & Operations Research*, 37(3), 582–597.
- Daskalaki, S., & Birbas, T., 2005, Efficient solutions for a university timetabling problem through integer programming, *European Journal of Operational Research*, 160(1), 106–120.
- Daskalaki, S., Birbas, T., & Housos, E., 2004, An integer programming formulation for a case study in university timetabling, *European Journal of Operational Research*, 153(1), 117–135.
- Demir, Y., & Çelik, C., 2016, Müfredat bazlı akademik zaman çizelgeleme probleminin çözümüne tam sayılı doğrusal programlama yaklaşımı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 145–159.
- Dimopoulou, M., & Miliotis, P., 2001, Implementation of a university course and examination timetabling system, *European Journal of Operational Research*. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00052-7).
- Eren, T., Taş, C., & Bedir, N., 2018, 0-1 tam sayı programlama ile ders programı çizelgeleme probleminin çözümü: Bir Yüksek öğretim kurumunda uygulama, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 166–175.
- Ertuğrul, İ., & Öztaş, G. Z., 2016, Ders programı oluşturulmasında 0-1 tam sayılı bulanık hedef programlama yaklaşımı, *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(1), 159–177.
- Fonseca, G. H. G., Santos, H. G., Carrano, E. G., & Stidsen, T. J. R., 2017, Integer programming techniques for educational timetabling, *European Journal of Operational Research*, 262(1), 28–39.
- Güler, M. G., & Geçici, E., 2020, A spreadsheet based decision support system for examination timetabling, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 28(3), 1584–1598.
- Günalay, Y., & Şahin, T., 2006, A decision support system for the university timetabling problem with instructor preferences, *Asian Journal of Information Technology*, 5(12), 1479–1484.
- Kamışlı Öztürk, Z., Kasımbeyli, N., Sağır Özdemir, M., Soyuöz Acar, M., Özçetin, E., Alegöz, M., & Ceylan, G., 2016, Kullanıcı tercihlerinin dikkate alınması durumunda üniversite ders çizelgeleme problemi, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27(1), 2–16.
- Kökçen, H., Özdemir, R., & Ahlatcıoğlu, M., 2014, Üniversite ders zaman çizelgeleme problemi için ikili tamsayı bir model ve bir uygulama, *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 43(1), 28–54.
- Lemos, A., Melo, F. S., Monteiro, P. T., & Lynce, I., 2019, Room usage optimization in timetabling: A case study at Universidade de Lisboa, *Operations Research Perspectives*, 6, 100092.
- Miranda, J., 2010, eClasSkeduler: a course scheduling system for the executive education unit at the Universidad de Chile, *Interfaces*, 40(3), 196–207. <https://doi.org/10.1287/inte.1090.0485>.
- Miranda, J., Rey, P. A., & Robles, J. M., 2012, udpSkeduler: a web architecture based decision support system for course and classroom scheduling, *Decision Support Systems*, 52(2), 505–513. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.10.011>.
- Oladokun, V. O., & Badmus, S. O., 2008, An integer linear programming model of a university course timetabling problem, *The Pacific Journal of Science and Technology*, 9(2), 426–431.
- Phillips, A. E., Waterer, H., Ehr Gott, M., & Ryan, D. M., 2015, Integer programming methods for large-scale practical classroom assignment problems, *Computers & Operations Research*, 53, 42–53.
- Piechowiak, S., & Kolski, C., 2004, Towards a generic object oriented decision support system for university timetabling: an interactive approach, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 3(01), 179–208.

- Python*, Retrieved July 30, 2019, from <https://www.python.org/>
- Sánchez-Partida, D., Martínez-Flores, J. L., & Olivares-Benitez, E., 2014, An integer linear programming model for a university timetabling problem considering time windows and consecutive periods, *Journal of Applied Operational Research*, 6(3), 158–173.
- Schimmelpfeng, K., & Helber, S., 2007, Application of a real-world university-course timetabling model solved by integer programming, *Or Spectrum*, 29(4), 783–803.
- Siddiqui, A. W., Raza, S. A., & Tariq, Z. M., 2018, A web-based group decision support system for academic term preparation, *Decision Support Systems*, 114, 1–17, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dss.2018.08.005>
- Solver Studio*, Retrieved November 1, 2019, from <https://solverstudio.org/>
- Uçar, U., İşleyen, S., & Demir, Y., 2015, Ders çizelgeleme probleminin bulanık AHP ve çok amaçlı karışık tam sayılı matematiksel modelle çözümü, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(3), 513–523.
- Vermuyten, Hendrik Lemmens, S., Marques, I., & Beliën, J., 2016, Developing compact course timetables with optimized student flows, *European Journal of Operational Research*, 251(2), 651–661.



TÜRKİYE'DEKİ KELEBEK TÜRLERİNİN BASAMAKLI EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI

Bahadır ELMAS 

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, İstatistik Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE
bahadir.elmas@msgsu.edu.tr

(Geliş/Received: 21.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.05.2021)

ÖZ: Kelebekler ekosistemdeki değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt verebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca çoğu kelebek türü larvaları, insan ve hayvanların yaşam ortamını ve gıda kaynaklarını etkileyen tarım ve orman zararlılarıdır. Bu nedenle kelebek türlerinin sınıflandırılması, tür araştırmalarının yanı sıra çevre koruma, tarım ve orman zararlılarının kontrolünde de önemlidir. Bu çalışmada Türkiye'deki 9 aile ve 416 kelebek türünü sınıflandırmak için yedi adet evrişimli sinir ağı transfer öğrenme yöntemiyle kullanılmıştır. Veri seti oluşturmak için 13528 görüntü toplanmış, veri artırma yöntemi ile görüntü sayısı 67640'a çıkarılmıştır. Eğitimde ezberlemenin önüne geçebilmek, ağların performansını ve güvenilirliğini artırmak için Stratified Shuffle Split, K fold cross validation yöntemleri kullanılmıştır. Tür sayısının fazlalığı, türlerin desen ve renk benzerliği nedeniyle ağların düşük başarı oranını artırmak için iki basamaklı ağ modeli kullanılmıştır. Modelde birinci basamakta bir, ikinci basamakta paralel bağlı dokuz ağ vardır. Birinci basamaktaki ailelere göre sınıflandırmada %95.88, ikinci basamaktaki tür sınıflandırmada ise %91.99 ile %100 arasında başarı oranı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Türkiye Kelebek Türleri, Kelebek Türlerinin Tanımlanması, Basamaklı Evrişimli Sinir Ağlar, Önceden Eğitilmiş Ağlar, Transfer Öğrenme

Classification of Butterfly Species in Turkey with Cascaded Convolutional Neural Networks

ABSTRACT: Butterflies have the ability to respond quickly to changes in the ecosystem. In addition, most butterfly species larvae are agricultural and forest pests that affect the habitats and food resources of humans and animals. Therefore, classification of butterfly species is important in environmental protection, agriculture and forest pest control as well as species research. In this study, seven convolutional neural network transfer learning methods were used to classify 9 families and 416 butterfly species in Turkey. In order to create a dataset, 13528 images were collected, and the number of images was increased to 67640 by data augmentation method. Stratified Shuffle Split, K fold cross validation methods were used to prevent memorization and increase the performance and reliability of networks. A cascaded network model was used to increase the low success rate of networks due to the excess number of species, the pattern and color similarity of species. In the model, there is one network on the first layer and nine networks connected in parallel on the second layer. A success rate of 95.88% was achieved in the classification according to families in the first layer and 91.99% to 100% in the classification of species in the second layer.

Key Words: Turkey Butterfly Species, Identification of Butterfly Species, Cascaded Convolutional Neural Networks, Pre-Trained Networks, Transfer Learning.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kelebekler, hayvanlar âleminin eklem bacaklılar şubesinde yer alan böcek sınıfına ait Lepidoptera takımındaki canlılardır. Dünya sistematik kelebek isimleri kayıtlarında (Shou ve diğ., 2006), 17 aile, 47 alt aile, 1690 cins ve 15141 kelebek türü kayıtlıdır (Xin ve diğ., 2020). Kelebekler böcek araştırmaları alanında büyük öneme sahiptirler. Bununla birlikte, yüksek benzerlikleri, tür sayısının fazla olması nedeniyle kelekelerin sınıflandırılması, düşük doğruluk ve yavaş tanıma hızı problemlerine sahiptir (Zhao ve diğ., 2019). Çoğu kelebek türü larvaları, insan ve hayvanların yaşam ortamını ve gıda kaynaklarını doğrudan etkileyen tarım ve orman zararlılarıdır. Ancak ekosistemin genel istikrarında önemli rol oynarlar. Kısa bir ömre sahip olmaları ve bu değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt verebildikleri için, ince ekosistem değişikliklerini belirlemede özellikle etkilidirler (Wang, W. ve diğ., 2019). Bu nedenle kelebek türlerinin otomatik olarak sınıflandırılması ile ilgili araştırmalar, sadece türlerin tanımlanması araştırmalarında değil, çevre koruma, tarım ve orman zararlılarının kontrolü gibi pratik çalışmalarda büyük önem taşımaktadır (Xue ve diğ., 2019; Xin ve diğ., 2020). Kelebekler taksonomik karakterlere göre doğru bir şekilde sınıflandırılması yılların tecrübesine sahip sınırlı sayıda uzmanları tarafından yapılabilir. Fakat taksonomistlerin ve eğitilmiş insanların sayısı günümüzde önemli ölçüde azalmıştır (Almryad ve Kutucu, 2020). Kelebek türleri arasındaki ayrım, uzmanlık ve zaman gerektirir, ancak görüntülerden özellikler çıkararak kelebek türlerini sınıflandıran yöntemlerin geliştirilmesi bu soruna çözüm olacaktır.

Mevcut kelebek türlerini sınıflandırma araştırmalarında iki temel sorun vardır. Birincisi; kelebek veri setinin toplanması zordur ve kelebek veri setine dâhil olan kelekelerin sayısı kapsamlı değildir. İkincisi; kelebek fotoğrafları numune ve doğal ortam fotoğrafları olmak üzere ikiye ayrılır. Sınıflandırma araştırmalarının büyük bir bölümü Şekil 1'de verildiği gibi numune fotoğraflarına dayanır. Numune fotoğrafları belirgin morfolojik özelliklere sahip desen fotoğraflarıdır. Bu tür fotoğraflarla yapılan sınıflandırma çözümleri doğal ortam fotoğrafları ile test edildiğinde başarı oranı düşüktür (Zhao ve diğ., 2019; Xin ve diğ., 2020).



Şekil 1. Kelebek numune fotoğrafları (Zhao vd., 2019).

Figure 1. Butterfly sample photos



Şekil 2. Doğal ortam kelebek fotoğrafları (Zhao vd., 2019).

Figure 2. Natural environment butterfly photos

Numune fotoğraflarıyla, doğal ortam fotoğraflarına dayalı sınıflandırma karşılaştırıldığında, doğal ortam sınıflandırması daha zordur (Xin ve diğ., 2020). Şekil 2'de görülebileceği gibi doğal ortam fotoğraf karesinde kelebek ya çok küçük kalmıştır ya kanat desenleri yeterince net değildir ya da diğer nesnelerin desenleri arasında renk ve desen olarak geri planda kalmıştır (Zhao ve diğ., 2019). Bu çalışmada yukarıdaki iki sorunun çözümüne katkı sağlamak amacıyla, Türkiye sınırları içerisindeki tüm kelebek türlerini kapsayan, %94.4'ü doğal ve %5.6'sı numune fotoğraflarından oluşan yeni bir veri seti oluşturulmuştur.

Türkiye barındırdığı kelebek türü sayısı ile Avrupa'daki tüm ülkelerden daha zengin bir ülkedir. Tüm Avrupa'da 482 tür bulunurken, Türkiye sınırları içerisinde 416 kelebek türü bulunmaktadır. Bu kelebek

türlerinin 45'i ise endemiktir. Türkiye'deki 9 aileye ait tür sayıları Çizelge 1'de, bu ailelere ait türlerin illere göre dağılımı ise Çizelge 2'de verilmiştir (Kelebek-Turk, 2020; Trakel, 2020).

Çizelge 1. Türkiye'deki aile ve tür sayıları.

Table 1. Family and species numbers in Turkey

Aile Adı	Tür Sayısı
Argynnidæ Ailesi	55
Danaidæ Ailesi	1
Hesperiidæ Ailesi	43
Libytheidæ Ailesi	1
Lycaenidæ Ailesi	182
Papilionidæ Ailesi	13
Pieridæ Ailesi	39
Riodinidæ Ailesi	1
Satyridæ Ailesi	81

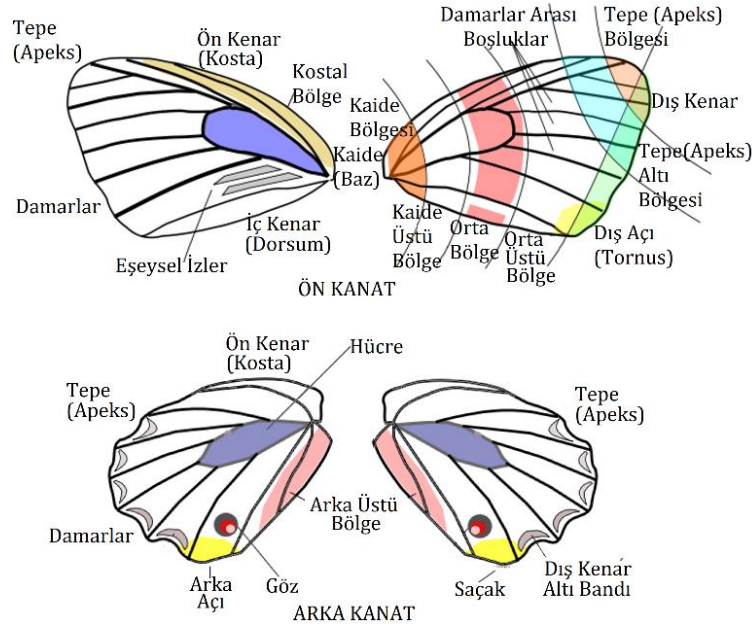
Çizelge 2. İllere göre kelebek türü dağılımı.

Table 2. Butterfly species distribution by city

İller	Tür Sav.	İller	Tür Sav.	İller	Tür Sav.	İller	Tür Sav.	İller	Tür Sav.
Adana	119	Bitlis	109	Gümüşhane	168	Kocaeli	109	Sinop	55
Adıyaman	77	Bolu	163	Hakkâri	129	Konya	166	Sivas	158
Afyon	99	Burdur	113	Hatay	110	Kütahya	146	Şanlıurfa	53
Ağrı	5	Bursa	144	Iğdır	43	Malatya	187	Şırnak	54
Aksaray	45	Çanakkale	114	Isparta	163	Manisa	104	Tekirdağ	88
Amasya	106	Çankırı	46	İstanbul	96	Mardin	79	Tokat	151
Ankara	173	Çorum	137	İzmir	117	Mersin	141	Trabzon	88
Antalya	167	Denizli	165	Kahramanmaraş	198	Muğla	122	Tunceli	121
Ardahan	116	Diyarbakır	72	Karabük	102	Muş	22	Uşak	30
Artvin	184	Düzce	44	Karaman	150	Nevşehir	73	Van	167
Aydın	53	Edirne	110	Kars	64	Niğde	85	Yalova	55
Balıkesir	108	Elazığ	137	Kastamonu	80	Ordu	41	Yozgat	62
Bartın	36	Erzincan	64	Kayseri	170	Osmaniye	164	Zonguldak	100
Batman	10	Erzurum	210	Kırıkkale	19	Rize	118		
Bayburt	78	Eskişehir	161	Kırklareli	128	Sakarya	78		
Bilecik	109	Gaziantep	42	Kırşehir	71	Samsun	59		
Bingöl	21	Giresun	159	Kilis	6	Siirt	145		

Kelebekler Türkiye'de nesli yüksek oranda tehlike altındaki canlı gruplarından. Neredeyse her 10 kelebek türünden birinin nesli yok olma tehlikesiyle karşı karşıyadır (Karaçetin ve Welch, 2011; Kelebek-Turk, 2020). Türkiye'deki endemik kelebeklerin %29'u tehlike altında veya tehlike altına girmeye yakın durumdadır. Endemik türlerin %49'u hakkında ise veri yetersizdir. Türkiye'deki 416 kelebek türünün %67'si düşük riskli iken %15'i hakkında yeterli veri yoktur. Ayrıca Türkiye'deki 26 kelebek türünün, kritik ve tehlikede kategorisinde iken 11 kelebek türününse neslinin tehlide yakın durumda olduğu tespit edilmiştir (Karaçetin, 2011). Yapılaşma, tarım ve su ürünleri yetiştiriciliği, enerji üretimi, madencilik, ulaşım koridorları, geçim ya da ticaret için biyolojik kaynak kullanımı, istilacı türler ve genler, kirlilik, jeolojik olaylar, iklim değişikliği kelebekleri tehdit eden faktörler olarak ön plana çıkmaktadır (Karaçetin, 2011). Kelebek türlerini ve sayılarını korumak için; alan koruma, alan yönetimi, tür yönetimi, eğitim, farkındalık yaratma, mevzuat, politika, bilgi ve araştırma gibi eylemler gerekmektedir (Karaçetin, 2011). Kelebekler insan sağlığı için gerekli olan çevre sağlığının mükemmel göstergeleridir. Bir bölgedeki kelebeklerin sayısal yoğunluk ve dağılımındaki düşüş, genellikle o çevrenin bozulduğuna işaret eder. Bu nedenle, kelebeklerin yereldeki çeşitlilik ve sayılarının izlenmesi insan sağlığı için gerekli çevresel önlemlerin alınmasında önemli bir araç olabilir (Karaçetin ve Welch, 2011). Bu nedenle, Kelebek türlerinin kolay ve hızlı bir şekilde sınıflandırılması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'deki tüm kelebek türlerinin tanımlanması için son yıllarda görsel tanımlamada yüksek başarı oranı gösteren evrişimli sinir ağları transfer öğrenme yöntemiyle kullanılmıştır. Evrişimli sinir ağlarının görsel tanımlamadaki bu başarısını keleklerin tanımlanmasında çok önemli bir unsur olan kelebek kanat şekilleri ve desenlerinde de göstereceği düşünülmüştür. Bu amaçla oluşturulacak veri setinde kelebek kanatları ön plana çıkarılmıştır. Sınıflandırmada çok önemli unsur olan kelebek kanadının anatomisi Şekil 3'te verilmiştir (Cebeci, 2020).



Şekil 3. Kelebek kanadının anatomisi.

Figure 3. Anatomy of the butterfly wing

Çalışmaya ışık tutması amacıyla literatürde 2014-2020 yılları arasında yapılmış 22 çalışma incelenmiştir. Literatür taraması sonucunda evrişimli sinir ağları ile Transfer Öğrenme yönteminin birçok çalışmada kullanıldığı ve başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. İncelenen söz konusu çalışmalarda varılan diğer bir sonuç ise AlexNet, ResNet, VGG ağlarının başarılı sonuçlar verdiği ve yaygın olarak kullanıldığıdır. Bu bilgiler ışığında çalışmada evrişimli sinir ağları ile transfer öğrenme yöntemi benimsenmiş ve AlexNet, ResNet18, ResNet50, ResNet101, VGG16, VGG19, DenseNet201 ağları kullanılmıştır. Literatürde Türkiye'ye özgü bir çalışma yapılmadığı, evrişimli sinir ağlarının eğitime uygun düzenli ve büyük bir veri seti olmadığı görülmüştür. Çok sayıda veri seti, doğa severlerin fotoğraf çekimleri, dergiler, kitaplar ve WEB sayfaları incelenerek yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Eğitimde ezberlemenin önüne geçebilmek, ağların performansını ve güvenilirliğini artırmak için, veri artırma, Stratified Shuffle Split (Katmanlı Karışık Bölme), K fold cross validation (K-katlamalı Çapraz doğrulama) gibi yöntemler kullanılmıştır. Tür sayısının fazlalığı, türlerin desen ve renk benzerliği nedeniyle ağların tek başına yeteri derecede başarılı olmadığı sonucuna varılması üzerine basamaklı (cascade) ağ yapısı kullanılmış ve hedeflenen sonuca ulaşılmıştır.

KAYNAK ARAŞTIRMASI (LITERATURE SURVEY)

Son yıllarda, keleklerin otomatik olarak sınıflandırılması gittikçe daha fazla araştırmacının dikkatini çekmiş ve kelebek sınıflandırma uygulamaları hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Andres Hernandez Serna ve Luz Fernanda Jimenez Segura, Avrupa ve Güney Amerika'daki balık, bitki ve kelebek türlerini sınıflandırmak için fotoğraflık görüntüleri kullanan yapay sinir ağları kullanılmıştır. Veri setindeki kelebek türü sayısı 11 olup görüntü sayısı 92'dir. Çalışmalarında kelebek sınıflandırmada %93.25 başarı oranı elde etmişlerdir (Serna ve Segura, 2014). Seung-Ho Kang ve arkadaşları kelekleri kanat şekillerine göre sınıflandırmak için üç katmanlı yapay sinir ağı tasarlamışlardır. Yapay sinir ağını

eğitmek için geri yayılım öğrenme algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmalarında 15 kelebek türünün 150 görüntüsü ile elde ettikleri başarı oranı %80.3'tür (Kang ve diğ., 2014). Yılmaz Kaya ve arkadaşları görüntülerdeki özel dokuları tespit etmek için LBP (Local Binary Pattern) üzerine inşa edilen iki yeni tanımlayıcı önerilmiştir. Çalışmalarını 14 türe ait ve her birinden 10'ar adet görüntünün bulunduğu 140 kelebek görüntüsü üzerinde test etmişler ve yapay sinir ağı ile yaptıkları sınıflandırmada %95.71 başarı oranı elde etmişlerdir (Kaya, Ertuğrul ve diğ., 2015). Yılmaz Kaya ve arkadaşlarının diğer bir çalışmasında kelebekleri sınıflandırmak için, geleneksel tanımlama yöntemlerine alternatif olarak otomatik olarak sınıflandırma için bir bilgisayarla görme yöntemi önerilmiştir. Yöntem, LBP ve yapay sinir ağına dayanmaktadır. Önerilen yöntemin etkililiğini değerlendirmek için beş türe ait toplam 50 kelebek görüntüsü kullanılmışlar ve %98 başarı oranı elde etmişlerdir (Kaya, Kayci ve diğ., 2015).

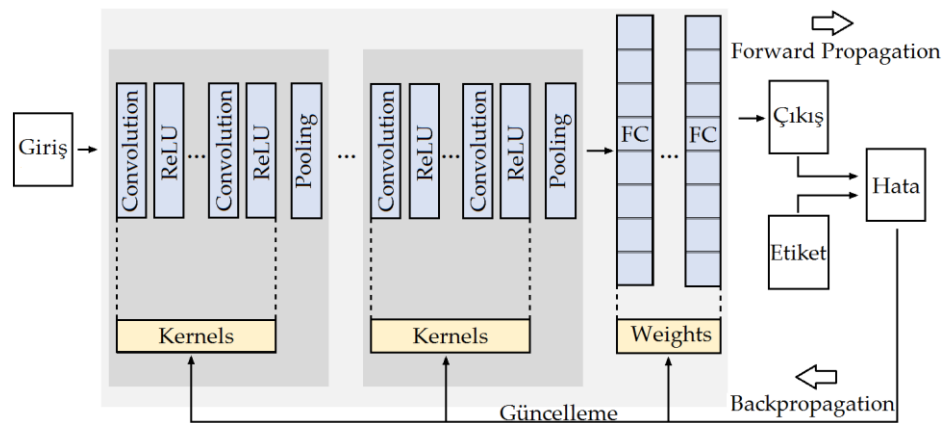
Erik Rodner ve arkadaşları 675 kelebek türüne ait 2120 görüntü içeren Ecuador ve 331 kelebek türüne ait 2310 görüntü içeren Costa Rica veri setlerini kullanarak kelebek sınıflandırması yapmışlardır. Çalışmalarında AlexNet ağını kullanmışlar, Ecuador veri setinde %55.7, Costa Rica veri setinde ise %79.2 başarı elde etmişlerdir (Rodner ve diğ., 2015). Juan Andres Carvajal ve arkadaşları, kelebek sınıflandırması yapmak için AlexNet, VGG16 ve VGG19 olmak üzere üç evrişimli sinir ağını kullanmışlardır. Araştırmalarında Sangay National Park (Petit, 2020) veri setindeki 15 kelebek türüne ait 2110 görüntüyü kullanmış ve %92 başarı elde etmişlerdir (Carvajal ve diğ., 2016). Zhou Ai-Ming ve arkadaşları, 6 ailenin 1117 kelebek türünü sınıflandırmak için CaffeNet modelini ve SVM (Support Vector Machine) sınıflandırıcı kullanmışlardır. CaffeNet modelinin ortalama başarı oranı %95.8 iken, Gabor özelliklerine dayalı SVM sınıflandırıcısı ortalama %94.8 başarı oranına sahiptir (Ming ve diğ., 2017). Qi Chang ve arkadaşları Kuzey Amerika'daki 636 kelebek türüne ait 14270 görüntüden oluşan yeni bir veri seti oluşturmuşlardır. Çalışmalarında ResNet18, ResNet34, VGG19, Inception-v3 ağlarında transfer öğrenme yöntemi kullanmışlar ve ResNet18'de %92.6 başarı elde etmişlerdir (Chang ve diğ., 2017). Juanying Xie ve arkadaşları 1176 kelebek türünün 4270 standart desen görüntüsünü ve 111 türün doğal yaşam ortamından 1425 görüntüsünü içeren Çin'deki tüm kelebek türlerinden oluşan bir kelebek veri seti oluşturmuşlardır. Kelebek sınıflandırma sistemini için Faster R-CNN derin öğrenme tekniğini önermişlerdir. ZF, VGG CNN M1024 ve VGG16 olmak üzere üç model kullanmışlardır. ZF'de %59.8, VGG CNN M1024'de %64.5 ve VGG16'da % 72.8'e başarı oranına ulaşmışlardır (Xie ve diğ., 2018). Lili Zhu ve Petros Spachos, 10 kelebek türünün 832 görüntüsü içeren Leeds Butterfly (Wang, J. ve diğ., 2009) veri seti üzerinde eğitim ve test yaparak geleneksel makine öğrenimi, derin öğrenme ve transfer öğrenme yöntemlerini kullanmışlardır. SVM'de %52.8, 4-Conv CNN'de %98.44, VGG19'da ise %98.53 başarı oranına ulaşmışlardır (Zhu ve Spachos, 2019). Ruoyan Zhao ve arkadaşları, 111 türe ait 5695 fotoğraftan oluşan veri setinde R-CNN kullanılarak kelebek sınıflandırması yapmışlar ve %70.4 başarı oranına ulaşmışlardır (Ruoyan ve diğ., 2019). Nur Nabila Kamaron Arzar ve arkadaşları, önceden eğitilmiş bir model olan GoogLeNet'i kullanan bir evrişimli sinir ağı önermişlerdir. Dört kelebek türüne ait 120 görüntü ile çalıştırdıkları modelde % 97.5 başarı elde etmişlerdir (Arzar ve diğ., 2019). Zhongqi Lin ve arkadaşları kelebek görüntüleri için S-CCNN (Skip-Connections Convolutional Neural Network) sınıflandırma yöntemini önermişlerdir. Toplam 56 türe ait 24836 laboratuvar görüntüsü kullanılırken, veri artırma yöntemi ile bu görüntüleri 173852'ye çıkarmışlardır. Yöntemlerinin başarı oranı %93.36'dır (Lin ve diğ., 2019). Manuel López-Antequera ve arkadaşları, COSFIRE modelinin CNN tabanlı bir kombinasyonunu önermişlerdir. Bu yöntemde, SVM sınıflandırıcısını eğitmek için CNN-COSFIRE özellik vektörünü kullanmışlardır. Önerdikleri yöntemi 7 türe ait toplam 619 görüntü üzerine uygulamışlar %96.57 başarı oranı elde etmişlerdir (Antequera ve diğ., 2019). Lin Nie ve arkadaşları, 82 kelebek türüne ait iç mekân ve dış mekân fotoğrafları içeren yeni bir kelebek veri seti oluşturmuşlar, kelebek sınıflandırmasında AlexNet, VGGNet ve ResNet olmak üzere üç evrişimli sinir ağının performansını incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda ResNet ağında %95 ile en yüksek sınıflandırma başarısı elde etmişlerdir (Nie ve diğ., 2017). Ayad Saad Almyrad ve arkadaşları 10 kelebek türüne ait 17769 görüntü içeren bir veri seti oluşturmuşlardır. Kelebek türlerin sınıflandırılmasında VGG16, VGG19 ve ResNet50 evrişimli sinir ağlarını kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarda %80 başarı elde etmişlerdir (Almyrad ve Kutucu, 2020). Çizelge 3'te 2014 ile 2020 yılları arasında yapılan yukarıdaki çalışmalar ve kullanılan yöntemler kronolojik olarak verilmiştir.

Çizelge 3. Literatür çalışmaları ve kullanılan yöntemler.*Table 3. Literature studies and methods used.*

Yapılan Çalışmalar	Tarih	Yöntem
Serna ve Segura	2014	Yapay Sinir Ağları
Kang ve diğ.	2014	Yapay Sinir Ağları
Kaya, Ertuğrul ve diğ.	2015	LBP
Kaya, Kayci ve diğ.	2015	LBP ve Yapay Sinir Ağı
Rodner ve diğ.	2015	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet)
Rodner ve diğ.	2015	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet)
Carvajal ve diğ.	2016	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet, VGG16 ve VGG19)
Ming ve diğ.	2017	CaffeNet
Ming ve diğ.	2017	SVM
Chang ve diğ.	2017	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (ResNet18, ResNet34, VGG19, Inception-v3)
Nie ve diğ.	2017	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet, VGGNet ve ResNet)
Xie ve diğ.	2018	Faster R-CNN (ZF)
Xie ve diğ.	2018	Faster R-CNN (VGG CNN M1024)
Xie ve diğ.	2018	Faster R-CNN (VGG16)
Zhu ve Spachos	2019	Makine Öğrenmesi (SVM)
Zhu ve Spachos	2019	Derin Öğrenme (4-Conv CNN)
Zhu ve Spachos	2019	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (VGG19)
Ruoyan ve diğ.	2019	R-CNN
Arzar ve diğ.	2019	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (GoogLeNet)
Lin ve diğ.	2019	S-CCNN (Skip-Connections Convolutional Neural Network)
Antequera ve diğ.	2019	Evrişimli Sinir Ağları-COSFIRE (SVM)
Almryad ve Kutucu	2020	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (VGG16, VGG19 ve ResNet50)

EVRIŞİMLİ SİNİR AĞLARI VE TRANSFER ÖĞRENME (CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS AND TRANSFER LEARNING)

Derin sinir ağları bilgisayarlı görme, konuşma, tanıma ve robotik içeren için birçok yapay zekâ uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Derin sinir ağlarının yaygın bir şekli ise çoklu evrişimli katmanlardan oluşan evrişimli sinir ağlarıdır (Gürkan ve Hanilçi, 2020). Evrişimli sinir ağları, ızgara benzeri bilinen bir topolojiye sahip veriyi işlemek için kullanılan bir tür sinir ağı olup bir derin öğrenme yöntemidir (Goodfellow ve diğ., 2015). İleri beslemeli mimariye sahiptir ve tamamen bağlı katmanlara sahip ağlara kıyasla daha iyi genelleme yapar (Nebauer, 1998; Indolia ve diğ., 2018). Daha çok örüntü tanıma, sınıflandırma, sinyal işleme, sözlük, ilaç, tıp, finans ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Evrişimli sinir ağları çoğunlukla Şekil 4'deki gibi Convolution, Rectified Linear Unit (ReLU), Pooling ve Fully Connected Layers katmanlarından oluşur (Lawrence ve diğ., 1997; Indolia ve diğ., 2018; Yamashita ve diğ., 2018; Baykal ve diğ., 2019; MathWorks, 2020).

**Şekil 4.** Evrişimli Sinir Ağlar*Figure 4. Convolutional Neural Networks*

Yeni bir evrişimli sinir ağı tasarlanmasının ve eğitmenin ilk adımı ağ mimarisini tanımlamaktır. Ağ mimarisi, dâhil edilen katmanların türlerine ve sayılarına bağlı olarak değişebilir. Dâhil edilen katmanların türleri ve sayısı, uygulamaya veya verilere bağlıdır. Uygulamada kategorik yanıtlar varsa, bir softmax ve sınıflandırma katmanına sahip olunmalı. Yanıt sürekli ise, ağın sonunda bir regresyon katmanının olması gerekir. Yalnızca bir veya iki evrişimli katmana sahip küçük bir ağ az sayıda gri tonlamalı görüntü verisini öğrenmek için yeterli olabilir. Diğer taraftan milyonlarca renkli görüntü içeren karmaşık veriler için daha karmaşık ağlara ihtiyaç duyulur (MathWorks, 2020). Evrişimli sinir ağlarında Şekil 4'te gösterildiği gibi ilk katmanlarda verilen girdi üzerinde, filtrelerle özellik çıkarımı gerçekleştirilir. Aynı zamanda bir yandan hesaplama maliyetini düşürmek diğer yandan ise girdiden öğrenilen özelliklerin özet bilgisini diğer katmanlara aktarmak için boyut düşürme fonksiyonları kullanılır. Daha sonra girdiden elde edilen özellikler tek boyutlu bir vektör haline getirilir ve tam bağlantılı katman veya katmanlara girdi olarak verilip, sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir. Ağın filtreler ve ağırlıklar altındaki performansı kayıp fonksiyonu ile hesaplanır ve öğrenilebilir parametreler yani filtreler ve ağırlıklar geri yayılım yoluyla kayıp değerine göre güncellenir (Nebauer, 1998). Evrişimli sinir ağlarının her biri farklı mimari kullanarak eğitim işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan evrişimli sinir ağları; AlexNet, DenseNet201, ResNet18, ResNet50, ResNet101, VGG16, VGG19'dur. Çizelge 4 ve Çizelge 5'te söz konusu ağların katman, derinlik, parametre sayısı, görüntü giriş boyutları ve ağ mimarileri verilmiştir (Zhou ve diğ., 2016; He ve diğ., 2016; Ye ve diğ., 2019; Theckedath ve Sedamkar, 2020).

Çizelge 4. Ağların katman, derinlik, parametre sayısı ve görüntü giriş boyutları

Table 4. Layer, depth, number of parameters and image input sizes of networks

	AlexNet	ResNet-18	ResNet-50	ResNet-101	VGG16	VGG19
Derinlik	8	18	50	101	16	19
Katman	25	72	177	347	41	47
Parametre (Milyon)	61	11.7	25.6	44.6	138	144
Resim Giriş Boyutu	227x227	224x224	224x224	224x224	224x224	224x224

Çizelge 5. Ağ mimarileri

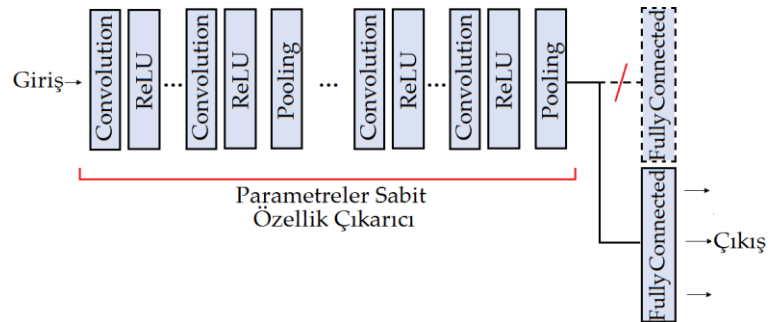
Table 5. Network architectures

AlexNet	DenseNet201	ResNet-18	ResNet-50	ResNet-101	VGG16	VGG19
11x11con,96 max-pool	7x7,con max-pool	7x7,con,64 max-pool	7x7,con,64 max-pool	7x7,con,64 max-pool	[3x3con,64]x2	[3x3con,64]x2
5x5con,256 max-pool	1x1,con 3x3,con x6	3x3con,64 3x3con,64 x2	1x1con,64 3x3con,64 x3	1x1con,64 3x3con,64 x3	[3x3con,128]x2 max-pool	[3x3con,128]x2 max-pool
3x3con,384	1x1,con	3x3con,128	1x1con,256	1x1con,256	[3x3con,256]x3	[3x3con,256]x4
3x3con,384	aver-pool	3x3con,128	1x1con,128	1x1con,128	max-pool	max-pool
3x3con,256 max-pool	1x1,con 3x3,con x12	3x3con,256 3x3con,256 x2	3x3con,128 1x1con,512 x2	3x3con,128 1x1con,512 x4	[3x3con,512]x3 max-pool	[3x3con,512]x4 max-pool
fc4096	1x1,con	3x3con,512	1x1con,256	1x1con,256	[3x3con,512]x3	[3x3con,512]x4
fc4096	aver-pool	3x3con,512	3x3con,256	3x3con,256	max-pool	max-pool
fc1000	1x1con	aver-pool	1x1con,1024	1x1con,1024	fc4096	fc4096
softmax	3x3,con 1x1,con aver-pool	fc1000 softmax	1x1con,512 3x3con,512 x3	1x1con,512 3x3con,512 x3	fc4096 fc1000 softmax	fc4096 fc1000 softmax
	1x1,con 3x3,con x32 aver-pool		1x1con,2048 aver-pool fc1000 softmax	1x1con,2048 aver-pool fc1000 softmax		
	fc1000,softmax					

Bazı evrişimli sinir ağlarının eğitilmesi, ağın karmaşıklığı ya da veri setinin büyüklüğü nedeniyle standart bilgisayar işlemcilerinde gerçekleştirmek oldukça zordur. Bu nedenle güçlü grafik işleme birimlerine ihtiyaç duyulur. Uzun süren eğitimler sonucunda eğitilmiş birçok modelden problem için uygun bir model seçilerek problemin çözümünde kullanılabilir. Eğitilmiş bir ağın, ilgili ikinci bir görevde yeniden tasarlandığı, hızlı ilerleme ve gelişmiş performans sağlayan bu makine öğrenmesi tekniğine transfer öğrenme denir. Transfer öğrenme, ağın eğitilmesi için yeterli zaman yok ve donanım yetersizse,

ne kadar veri olduğuna dair endişelenmeden, bir derin öğrenme modeli oluşturmanın en hızlı ve en kolay yoludur. Geleneksel makine öğrenme teknikleri, her görevi sıfırdan öğrenmeye çalışırken, transfer öğrenme teknikleri, önceki görevlerden elde ettiği bilgileri yeni bir görevi öğrenme hedefine aktarır (Pan ve Yang, 2010). Öğrenilen niteliklerin taşınabilir olması derin öğrenmeyi eski ve sık öğrenme yaklaşımlarından ayıran en önemli avantajlarından biridir ve derin öğrenmeyi küçük veri problemlerinde etkin yapar (Chollet, 2017).

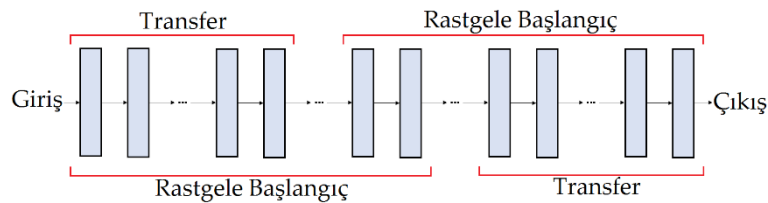
Evrişimli sinir ağlar giriş ve ara katmanlar genellikle kenar, doku, desen, gibi üst seviye özellikleri öğrenirken son katmanlar daha spesifik özellikleri öğrenir. Bu yüzden giriş ve ara katmanlar korunurken son katman probleme uygun şekilde tasarlanıp, mevcut veri setiyle eğiterek hızlı bir şekilde yeni bir model elde edilir (Brownlee, 2020). Veri ve hedef görev, orijinal modelin üzerinde çalıştığı veri ve hedef görevle benzerlik gösteriyorsa, bu yaklaşım en iyi sonucu verir. Bununla birlikte, bir modeli sıfırdan eğitmek için yeterli veri varsa ve görevler o kadar yakın olmasa da önceden eğitilmiş bir model kullanarak parametreleri başlatmak, rasgele başlatmadan daha iyi sonuçlar verebilir. Ayrıca sahip olunan veri problemleri ve miktarı yetersiz ise; bu veri için tasarlanmış özel model, önce genel bir görev için hazırlanmış büyük bir veri kümesi kullanılarak eğitilip daha sonra mevcut veri ile eğitilebilir. Bu yöntemde aktarılan şey temel olarak parametrelerin başlangıç değerleridir. Ağırlıkları rastgele başlatmak yerine önceden eğitilmiş bir ağı kullanarak başlatmak; ağı öğrenmede iyi bir başlangıç yapmasını, öğrenme gelişiminde daha dik eğimi ve daha yüksek performans elde etmesini sağlayarak yakınsamayı hızlandırır. Ayrıca yeterli veri olmadığı durumlarda, transfer öğrenme ağı aşırı öğrenmeden koruyarak eğitmek için iyi bir seçenektir. Şekil 5'teki gibi Tam Bağlı katman dışındaki tüm katmanları aktarmak en yaygın transfer öğrenme türüdür. Bu çalışmada da bu yöntemin kullanılması tercih edilmiştir.



Şekil 5. Tam bağlı katmanların probleme göre tasarımı.

Figure 5. Design of fully connected layers according to the problem

Ayrıca önceden eğitilmiş bir ağı Şekil 6'daki gibi ilk n katmanını bir hedef ağı aktarıp geri kalan katmanları rastgele başlatmak da mümkündür. Aktarılan kısmın, ilk katmanlar olması da gerekmez. Görevler aynıysa ancak girdi verilerinin türü biraz farklıysa, son katmanları da aktarmak mümkündür.

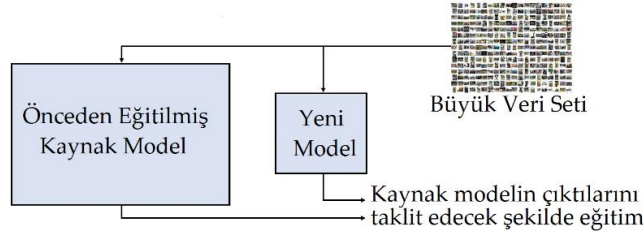


Şekil 6. İlk ve son katmanların transferi

Figure 6. Transfer of the first and last layers

Transfer öğrenme pek çok görev için kullanılabilir. Ancak bir model başka bir modele aktarmak her zaman mümkün değildir. Veri türünün ve görevin oldukça farklı olduğu durumlar bu kapsama girer. Transfer öğreniminin uygulanamayabileceği bir durum, özellikleri aktarılan model ile aktarılan modelin mimarisinin uyumsuzluk durumudur. Farklı mimarilere sahip modeller arasında bilgi aktarımını sağlayan teknik model ise Şekil 7'de verilen damıttır. Önceden eğitilmiş bir modelin

damıtılması; yeni modeli, doğrudan veriler üzerinde eğitmek yerine önceden eğitilmiş modelin çıktılarını taklit edecek şekilde eğitilmesidir. Bu yaklaşım özellikle kaynak modelden daha küçük bir modelin eğitilmesinde oldukça verimlidir.



Şekil 7. Eğitilmiş bir modelin damıtılması

Figure 7. Distillation of a training model

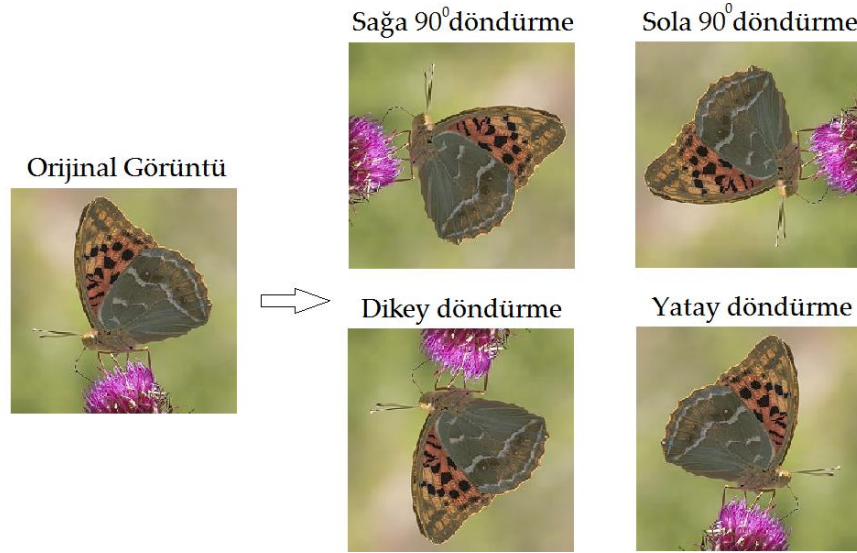
Çalışma için oluşturulmuş veri seti, ağlara giriş katmanında verilmiştir. Ağların giriş katmanından sınıflandırma katmanına kadar olan ara katmanlar Şekil 5'teki gibi korunmuştur. Çalışmada kullanılan ağlar 1000 sınıflandırma yaparken bu çalışmada birinci yöntemde 416 türü, ikinci yöntemde önce 9 aile sonra aile tür sayısına bağlı olarak 1 ile 171 arasında sınıflandırma yapmaktadır. Ağlardan AlexNet, VGG16 ve VGG19'da havuzlama katmanında maksimum havuzlama yöntemi kullanılırken, DenseNet201, ResNet18, ResNet50 ve ResNet101 ağlarında ise maksimum ve ortalama havuzlama yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ağlar oluşturulan veri setiyle MATLAB ortamında eğitilmiştir (MATLAB R2019a). Eğitimde kullanılan bilgisayarın işletim sistemi 64 bit, işlemcisi Intel(R) Core(TM) i7-7820HQ CPU @ 2.90 GHz, RAM'i 16 GB olup ekran kartı Radeon Pro 560'dır.

VERİ SETİNİN TOPLANMASI (DATA SET COLLECTION)

Tanımlayıcı sistemler geliştirilirken karşılaşılan en büyük sorun güvenilir ve performans artırıcı veri setlerinin olmamasıdır. Türkiye'deki kelebek veri setleri; doğaseverlerin fotoğraf çekimleri ve çeşitli yayınlardaki fotoğraflardan oluşmaktadır. Söz konusu veri setlerindeki tür başına görüntü sayısı yeterli olmayıp, türler arasında görüntü sayı dengesi yoktur. Çalışma için toplanan fotoğrafların %94.36'sı doğadan çekilen fotoğraflar olup, fotoğraf karesine kelebeklerle birlikte çok fazla nesne ve bu nesnelere ait renk ve/veya desen vardır. Kelebek tanımlamada kelebek kanat desenlerinin ve şeklinin çekilen fotoğraflarda ön plana çıkması sınıflandırma ve tanımlama başarısını artıracak önemli bir unsurdur. Toplanarak bir araya getirilen fotoğrafların önemli bir bölümünde kelebek, çekilen fotoğraf karesinde ya çok küçük kalmıştır ya kanat desenleri ve şekilleri yeterince net değildir ya da diğer nesnelere ait renk ve desen olarak geri planda kalmıştır. Söz konusu sorunları çözmek amacıyla; görüntüler kırpma ve kesme yöntemleriyle yeniden düzenlenmiştir. Özellikle kelebek ön-arka kanat desen ve şekillerinin fotoğraflarda belirgin olarak görülmesine özen gösterilmiştir. Bunun yanı sıra düzenleme yapılırken fotoğraf karesinin kelebek görüntüsüyle birlikte doğal ortam nesne, desen ve renkleri de içermesi sağlanmıştır. Böylece bu veri setiyle eğitilecek ağ, numune fotoğraflarının yanı sıra doğal ortam fotoğraflarını da sınıflandırılabilir.

İzlenen bu yöntem sonucunda Türkiye'deki Argynnidæ, Danaidæ, Hesperiidæ, Libytheidæ, Lycaenidæ, Papilionidæ Pieridæ, Riodinidæ ve Satyridæ olmak üzere dokuz kelebek ailesine ait 416 kelebek türünün, çekim açısı, pozisyonları, mesafesi ve arka planları dikkate alınarak veri seti oluşturmak amacıyla çok sayıda veri seti, doğaseverlerin fotoğraf çekimleri, dergiler, kitaplar ve WEB sayfaları gözden geçirilmiştir. Bu süreç sonunda 12766 doğal ortam fotoğrafı söz konusu kaynaklardan toplanarak bir veri seti oluşturulmuştur. Ayrıca veri setine 762 adet laboratuvar ortamında çekilmiş numune fotoğraflar eklenmiştir. Böylece veri setindeki kelebek görüntü sayısı 13528'e ulaşmıştır. Bunun yanı sıra Türkiye sınırları içerisinde birer adet türü bulunan Danaidæ, Libytheidæ ve Riodinidæ ailesinden yedişer adet daha tür görüntüleri toplanmış ve bu ailelere ait ağ eğitiminde kullanılmıştır.

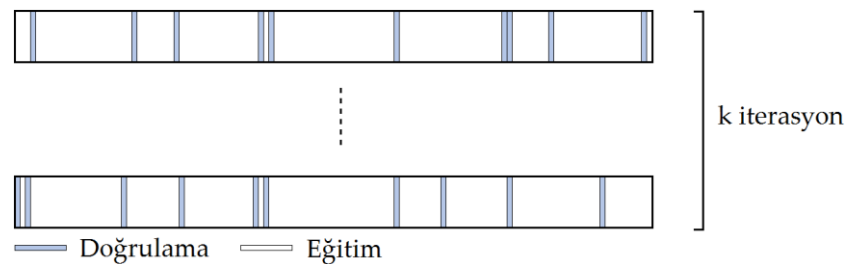
Sinir ağlarında küçük veri setleri modellerin veriyi ezberlemesine, dolayısıyla modellerin düşük doğrulukta çalışmasına neden olmaktadır. Bu sorunu çözmek için ise veri artırımı yöntemleri uygulanır. Veri artırımı resimler için; döndürme, öteleme, kırpma, soldurma, ölçeklendirme gibi teknikler ile orijinal veriden sentetik kopyalarının üretme işlemidir (Mash ve diğ., 2016). Çalışmada veri setindeki her bir görüntüye Şekil 8'deki gibi sağa 90°, sola 90°, dikey ve yatay çevirme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemlerin sonucunda görüntü sayısı 13528'den 67640'a çıkmıştır. Veri artırımı işlemi sonucunda ikinci metotda kelebek ailesini sınıflandırmada %17.23, tür sınıflandırmada ise ortalama %12.5 başarı oranı artmıştır.



Şekil 8. Veri artırımı
Figure 8. Data Augmentation

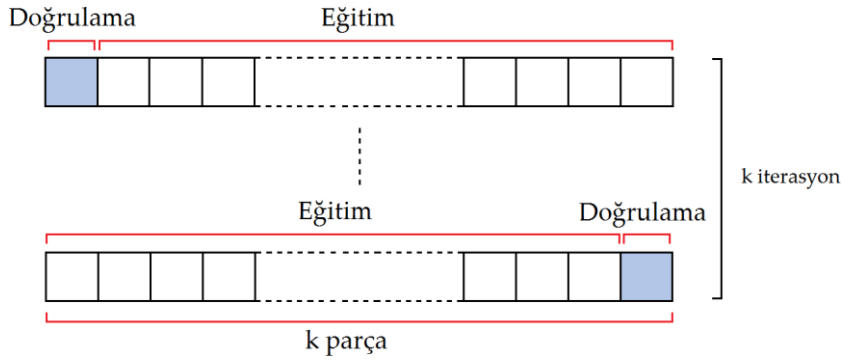
DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Ağların eğitilmesi süreçlerinde veri seti, eğitim ve doğrulama veri seti olmak üzere iki gruba ayrılır. Ağ başarı oranı eğitim ve doğrulama veri setine bağlı olarak yüksek değişirliğe (variance) sahiptir (Chollet, 2017). Eğitim ve doğrulama veri setinin tüm veri setini temsil etmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan iki yöntem uygulanmıştır. Birinci yöntem; Stratified Shuffle Split olarak adlandırılan yöntemdir (Kaggle, 2020; Medium, 2020; Github, 2020). Veri setinden her defasında Şekil 9'daki gibi rastgele veri alınarak, verinin %10'u doğrulama geri kalanı ise eğitim amaçlı kullanılmıştır. Bu işlem 10 defa tekrarlanmış ve her bir ağ 10'ar defa eğitilmiştir. Daha sonra elde edilen doğrulama sonuçlarının ortalama değeri alınmıştır.



Şekil 9. Katmanlı Karışık Bölme
Figure 9. Stratified Shuffle Split

Kullanılan ikinci yöntem ise K-fold cross validation yöntemidir. Bu yöntemde; Şekil 10'daki gibi veri seti 10 parçaya ayrılmış, ağ 9 parça veriyle eğitilmiş, kalan veri doğrulama için kullanılmıştır (Chollet, 2017). Bu işlem 10 defa tekrarlanmış ve her bir ağ 10'ar defa eğitilmiş daha sonra doğrulama sonuçlarının ortalama değeri alınmıştır.

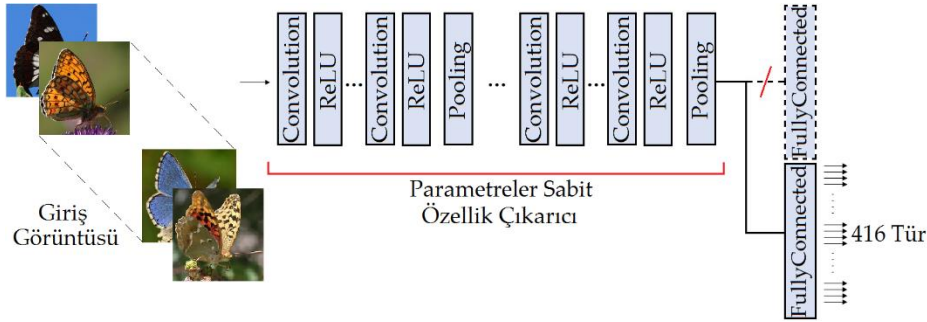


Şekil 10. K-katlamalı Çapraz doğrulama

Figure 10. K-fold Cross Validation

Her iki yöntem çalışmanın değerlendirmesi sürecinde kullanılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada verilen sonuçlar her iki yöntemin ortalama değeridir.

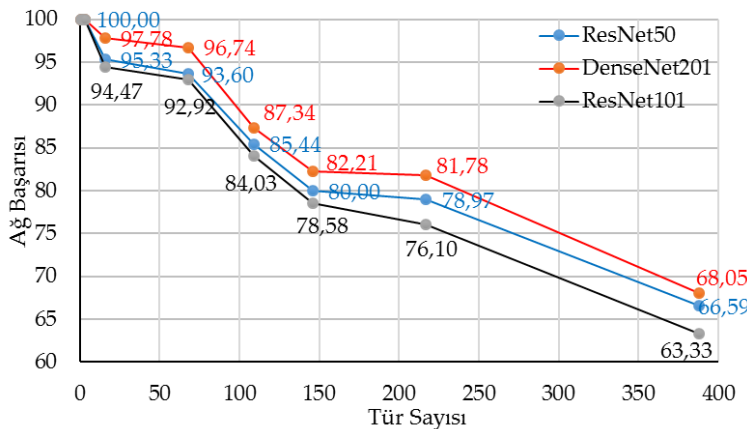
Kelebek türlerinin sınıflandırılması için iki metot izlenmiştir. Birinci yöntemde; Şekil 11’de verildiği gibi 416 kelebek türünü sınıflandırmak amacıyla önceden eğitilmiş evrişimli sinir ağlarının çıkış katmanı 416 yapılmış ve çalışma için oluşturulan veri setleriyle ağlar eğitilerek sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. Birinci yöntemde kullanılan ağ mimarisini.

Figure 11. Network architecture used in the first method.

Kelebek kanatlarının desen karmaşıklığı ve benzerliği kelebek sınıflandırmayı zorlaştıran bir unsurdur. Özellikle veri setindeki kelebek tür sayısı arttıkça bu daha da önemli bir unsur haline gelmektedir. Şekil 12’deki grafikten de görülebileceği gibi çalışmada kullanılan en başarılı üç ağın performansı veri setine yeni aileler, dolayısıyla yeni türler eklendikçe düşmüştür.



Şekil 12. Tür sayısı artışı-ağ başarısı

Figure 12. Species increase-network accuracy

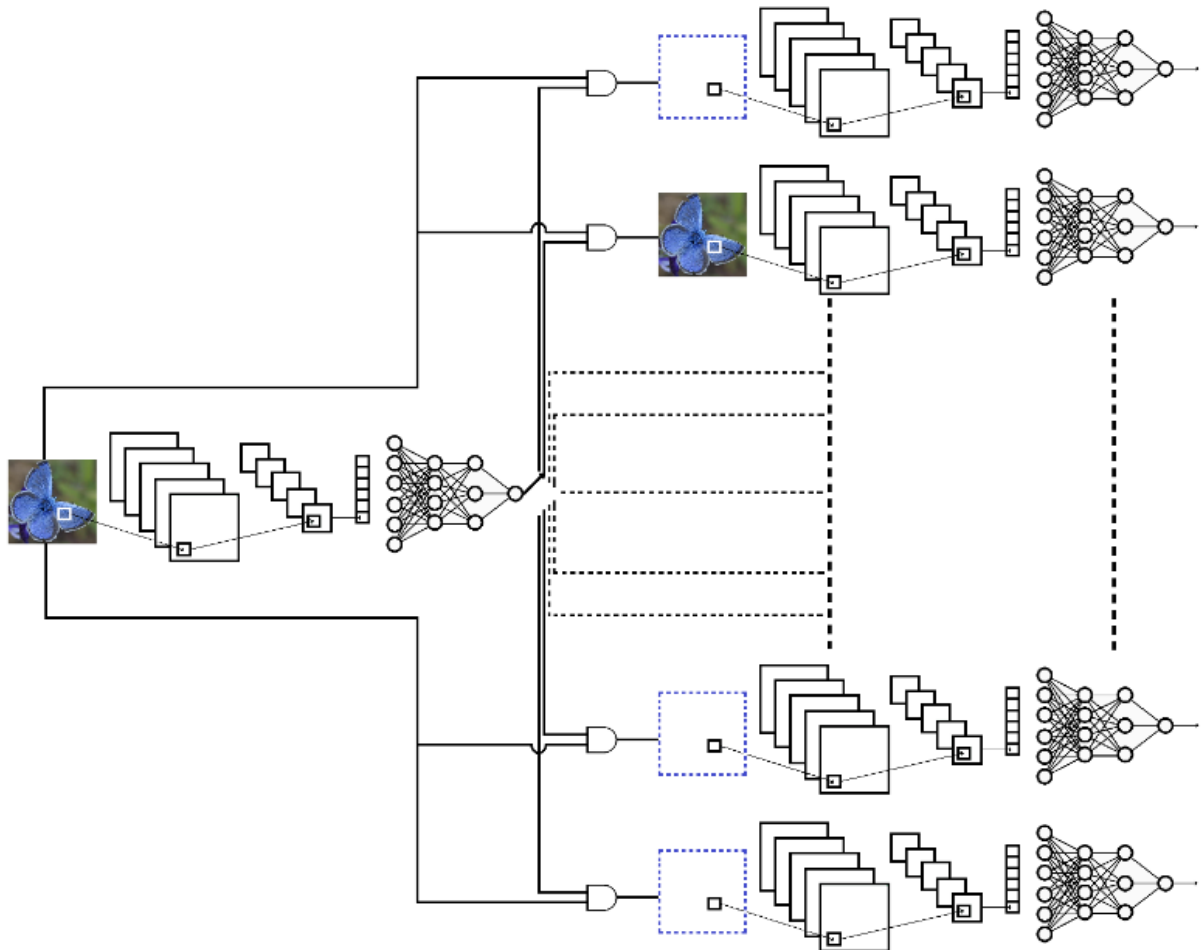
Çalışmada kullanılan yedi ağın 416 türü sınıflandırma performansları Çizelge 6'da verilmiştir. Ağların 416 kelebek türünü sınıflandırma performansları %36.67 ile %68.05 arasında değişmektedir.

Çizelge 6. Birinci yöntemle göre 416 türün sınıflandırma performansları.

Table 6. Identification performances of 416 species according to the first method.

Ağlar	Ağ Doğruluk
AlexNet	51.13
DenseNet201	68.05
ResNet18	51.96
ResNet50	66.59
ResNet101	63.33
VGG16	41.29
VGG19	36.67

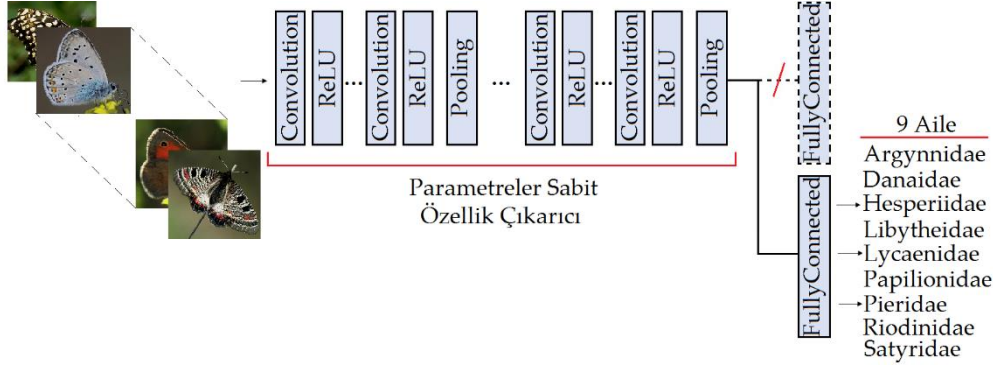
Elde edilen sonuçlar, çalışmada hedeflenen sonuçlardan çok uzaktır. Bu nedenle ikinci bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemdeki model Şekil 13'te verilmiştir. Model evrişimli sinir ağlarının basamaklı (cascaded) bağlanmasından oluşmaktadır. Birinci basamakta bir, ikinci basamakta birbirine paralel dokuz evrişimli sinir ağı vardır. Birinci basamaktaki evrişimli sinir ağı, aynı aile ait kelebek fotoğraflarının bir araya getirilmesiyle oluşan dokuz klasördeki veriyle eğitilmiştir. Bu basamaktaki ağ aile sınıflandırması yapmaktadır. İkinci basamaktaki dokuz ağın her biri ise söz konusu aileye ait veri setiyle tür sınıflandırması için ayrı ayrı eğitilmiştir.



Şekil 13. İkinci yöntemde kullanılan ağ mimarisi.

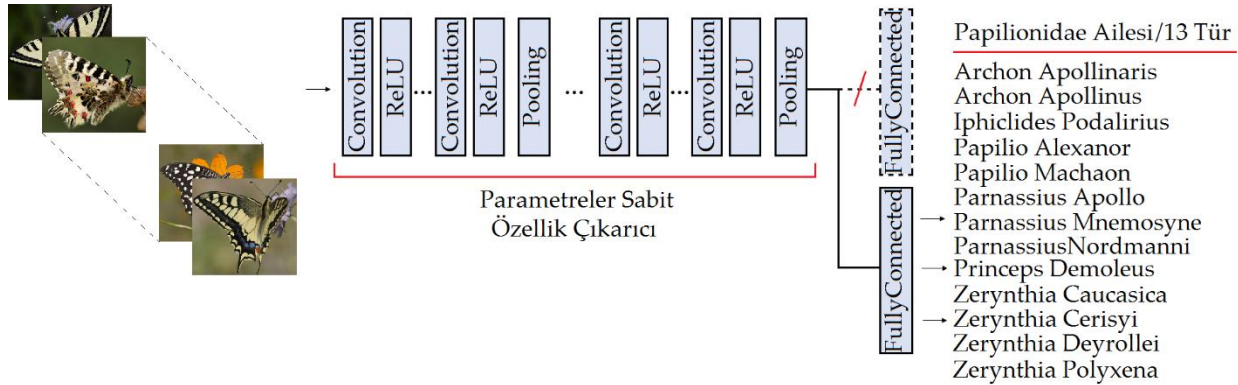
Figure 13. The network architecture used in the second method.

Modelin çalışma prensibi şu şekildedir; birinci basamaktaki ağın doğruluk sonucuna göre ikinci basamaktaki ağın girişine söz konusu kelebek görüntüsü yazılım aracılığıyla yönlendirilir ve ağ çalışması aktiflenir. Çıkan sonuç kelebek görüntüsünün hangi aileye ait olduğu ve bu ailenin hangi türü olduğu bilgisidir. Şekil 14'te birinci basamakta dokuz ailenin sınıflandırmasını gerçekleştiren evrişimli sinir ağ'ın yapısı, Şekil 15'te ise ikinci basamaktaki dokuz ağdan biri olan Papilionidae ailesinin ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 14. İkinci yöntemin birinci katmana ait ağ mimarisi.

Figure 14. First-layer network architecture of the second method



Şekil 15. İkinci yöntemin ikinci katmana ait ağ mimarisi (Papilionidae Ailesi için).

Figure 15. Second-layer network architecture of the second method (For the family Papilionidae)

Çizelge 7'de çalışmada kullanılan yedi ağın birinci basamaktaki aile sınıflandırma doğruluk sonuçları verilmiştir.

Çizelge 7. Birinci katmanın aile sınıflandırma doğruluğu.

Table 7. Family classification accuracy of first layer.

Ağlar	Ağ Doğruluk
AlexNet	87.31
DenseNet201	95.88
ResNet18	91.86
ResNet50	94.14
ResNet101	95.23
VGG16	88.91
VGG19	89.66

Birinci basamaktaki sınıflandırma doğruluğu %87.31 ile %95.88 arasında değişmektedir. Çizelge 8'de ise çalışmada kullanılan her bir ağın ikinci basamaktaki tür sınıflandırma sonuçlarıdır.

Çizelge 8. İkinci Katmandaki Ağların Tür Sınıflandırma Oranları.*Table 8. Species Classification Rates of Networks in The Second Layer*

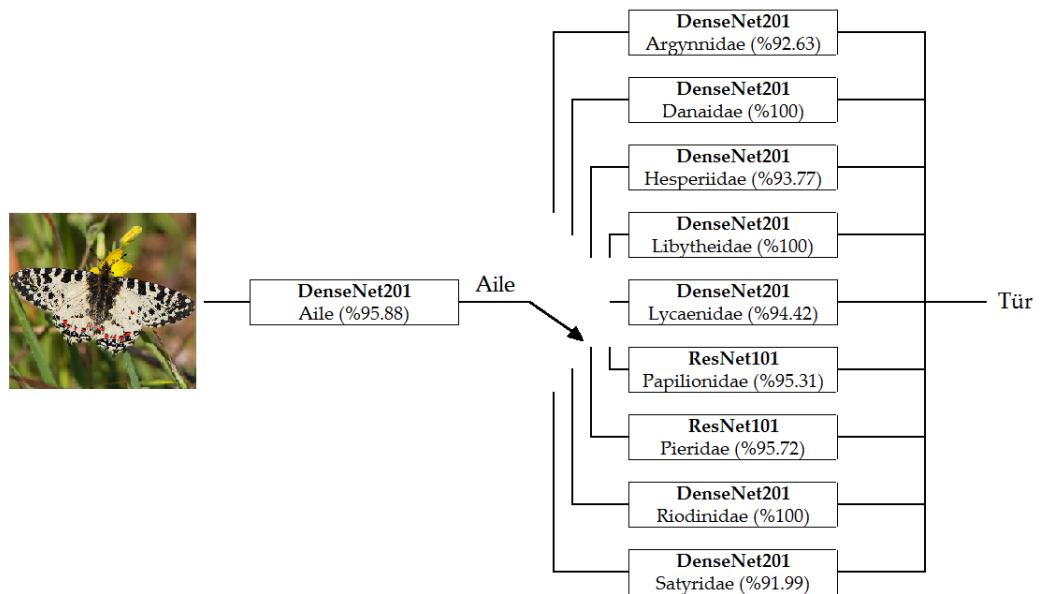
	AlexNet	DenseNet201	ResNet18	ResNet50	ResNet101	VGG16	VGG19
Argynnidae	76.68	92.63	85.30	92.08	90.67	82.75	85.94
Danaidae	100	100	100	100	100	100	100
Hesperiidae	85.18	93.77	87.22	90.86	91.82	79.74	86.07
Libytheidae	100	100	100	100	100	100	100
Lycaenidae	81.41	94.42	86.77	92.01	92.40	83.58	89.39
Papilionidae	87.73	94.82	92.59	93.35	95.31	88.05	82.88
Pieridae	87.67	95.33	92.33	93.35	95.72	87.48	81.34
Riodinidae	100	100	100	100	100	100	100
Satyridae	67.09	91.99	82.56	85.62	91.12	78.59	81.28

Çizelge 8'deki ağ başarı verileri incelendiğinde; Argynnidae, Danaidae, Hesperiidae, Libytheidae, Lycaenidae, Riodinidae ve Satyridae ailelerinin tür sınıflandırmasında DenseNet 201, Papilionidae ve Pieridae ailelerinin tür sınıflandırmasında ise ResNet101 ağının daha başarılı olduğu görülebilir. Bu iki ağın ikinci basamaktaki tür sınıflandırma başarı oranları Çizelge 9'da görülebileceği gibi %91.99 ile %100 arasında değişmektedir.

Çizelge 9. DenseNet201 ve ResNet101 Ağlarının Tür Sınıflandırma Oranları.*Table 9. Species Identification Rates of DenseNet 201 and ResNet 101 Networks*

Aile	DenseNet201	ResNet101
Argynnidae	92.63	---
Danaidae	100	---
Hesperiidae	93.77	---
Libytheidae	100	---
Lycaenidae	94.42	---
Papilionidae	---	95.31
Pieridae	---	95.72
Riodinidae	100	---
Satyridae	91.99	---

DeneySEL çalışmalar sonucunda Çizelge 9'dan hareketle yöntemin basamaklı (cascaded) ağ yapısı Şekil 16'daki gibi belirlenmiştir.

**Şekil 16.** Basamaklı Ağ.*Figure 16. Cascaded Network.*

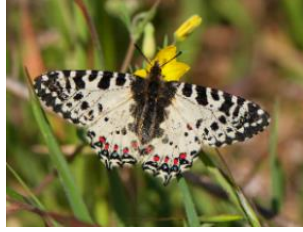
Birinci yöntemde en başarılı ağ için tür sınıflandırma başarı oranı %68.05 iken, ikinci yöntemde en başarılı ağın tür sınıflandırma başarı oranı aileye göre %91.99 ile %100 arasında değişmektedir. İkinci yöntemin sınıflandırma performansı birinci yöntemde göre %35 ile %46 arasında artmıştır. Şekil 16'daki modelin Stratified Shuffle Split ve K-fold cross validation yöntemi kullanılarak eğitim ve test sürelerinin ortalama değer tablosu Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Eğitim ve test süreleri

Table 10. Training and testing times

Birinci Basamak			İkinci Basamak		
Ağ	Eğitim Süresi	Test Süresi	Ağ	Eğitim Süresi	Test Süresi
Aile (DenseNet201)	66475 sn	6533 sn	Argynnidae (DenseNet201)	9115 sn	537 sn
			Danaidae (DenseNet201)	6645 sn	342 sn
			Hesperiidae (DenseNet201)	5889 sn	313 sn
			Libytheidae (DenseNet201)	5770 sn	296 sn
			Lycaenidae (DenseNet201)	29791 sn	1612 sn
			Papilionidae (ResNet101)	10982 sn	516 sn
			Pieridae (ResNet101)	6059 sn	315 sn
			Riodinidae (DenseNet201)	6917 sn	385 sn
			Satyridae (DenseNet201)	7810 sn	361 sn

Yöntemin başarısını test etmek amacıyla rastgele seçilen Şekil 17'deki Papilionidae ailesinden Zerynthia Cerisyi görüntüsü birinci katmandaki ağın girişine verilmiştir.



Şekil 17. Papilionidae ailesi-Zerynthia Cerisyi.

Figure 17. Papilionidae family-Zerynthia Cerisyi

Birinci basamaktaki DenseNet201 ağının aile sınıflandırma Hata Matrisi (Confusion Matrisi) Şekil 18'de Hata, Precision, Recall ve F1 Score değerleri Çizelge 11'de verilmiştir.

	Argynnide	Danaidae	Hesperiidae	Libytheidae	Lycaenidae	Papilionidae	Pieridae	Riodinidae	Satyridae
Argynnide	8593 0,93	0 0,00	197 0,02	96 0,01	0 0,00	104 0,01	97 0,01	0 0,00	183 0,02
Danaidae	0 0,00	6645 1,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Hesperiidae	152 0,03	0 0,00	5228 0,94	69 0,01	0 0,00	0 0,00	43 0,01	0 0,00	73 0,01
Libytheidae	0 0,00	0 0,00	0 0,00	5770 1,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Lycaenidae	283 0,02	0 0,00	171 0,01	0 0,00	13195 0,94	0 0,00	182 0,01	0 0,00	194 0,01
Papilionidae	138 0,02	0 0,00	0 0,00	67 0,01	0 0,00	6898 0,95	83 0,01	0 0,00	74 0,01
Pieridae	75 0,01	0 0,00	59 0,01	0 0,00	0 0,00	89 0,01	5885 0,95	0 0,00	77 0,01
Riodinidae	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	5620 1,00	0 0,00
Satyridae	194 0,03	0 0,00	152 0,02	88 0,01	0 0,00	72 0,01	75 0,01	0 0,00	6719 0,92

Şekil 18. Birinci katmanın hata matrisi.

Figure 18. The confusion matrix of the first layer.

Çizelge 11. Sınıflandırma metrikleri

Table 11. Classification metrics

Metrikler	Oran	Metrikler	Oran
Hata	0,0412	Recall	0,9593
Precision	0,9588	F1 Score	0,9589

Bu matristeki Papilionidae ailesinin ilgili satırı Şekil 19'da verilmiştir. İlgili satırdan görüleceği üzere Zerynthia Cerisyi kelebek görüntüsünün Papilionidae ailesine ait olduğu %95 başarı oranı ile belirlenmiştir.

Papilionidae	138	0	0	67	0	6898	83	0	74
	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,95	0,01	0,00	0,01

Şekil 19. Papilionidae ailesinin hata matrisindeki satırı

Figure 19. Row in the confusion matrix of the family Papilionidae

Modelin çalışma prensibi gereği kelebek görüntüsü ikinci katmandaki Papilionidae ailesine ait altıncı ağız girişine yazılım aracılığıyla yönlendirilmiş ve söz konusu ağız çalışması aktiflenmiştir. İkinci basamaktaki ResNet101 ağızının Papilionidae ailesine ait tür sınıflandırma Hata Matrisi Şekil 20'de Hata, Precision, Recall ve F1 Score değerleri Çizelge 12'de verilmiştir.

	Archon apollinaris	Archon Apollinus	Iphiclides Podalirius	Papilio Alexanor	Papilio Machaon	Parnassius Apollo	Parnassius Mnemosyne	Parnassius Nordmanni	Princeps Demoleus	Zerynthia Caucasica	Zerynthia Cerisyi	Zerynthia Deyrollei	Zerynthia Polyxena
Archon apollinaris	523 1,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Archon Apollinus	0 0,00	413 0,95	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	22 0,05	0 0,00
Iphiclides Podalirius	0 0,00	0 0,00	471 0,90	0 0,00	25 0,05	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	28 0,05	0 0,00	0 0,00
Papilio Alexanor	0 0,00	0 0,00	0 0,00	452 1,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Papilio Machaon	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	609 1,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Parnassius Apollo	0 0,00	0 0,00	27 0,05	0 0,00	0 0,00	507 0,95	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Parnassius Mnemosyne	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	587 1,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Parnassius Nordmanni	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	15 0,02	0 0,00	0 0,00	721 0,98	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Princeps Demoleus	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	591 1,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00
Zerynthia Caucasica	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	421 0,85	53 0,11	23 0,05	0 0,00
Zerynthia Cerisyi	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	535 0,95	0 0,00	29 0,05
Zerynthia Deyrollei	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	123 0,19	523 0,81	0 0,00
Zerynthia Polyxena	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	0 0,00	562 1,00

Şekil 20. İkinci katmanın hata matrisi.

Figure 20. The confusion matrix of the second layer.

Çizelge 12. Sınıflandırma metrikleri

Table 12. Classification metrics

Metrikler	Oran	Metrikler	Oran
Hata Oranı	0,0475	Recall	0,9600
Precision	0,9525	F1 Score	0,9540

Hata Matrisinde Zerynthia Cerisyi kelebek türünün ilgili satırı Şekil 21’de verilmiştir. Türün sınıflandırma başarı oranı %95’dir.

Zerynthia Cerisyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	535	0	29
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,00	0,05

Şekil 21. Zerynthia Cerisyi tür sınıflandırma doğruluğu

Figure 21. Zerynthia Cerisyi species identification accuracy

Papilionidae ailesinden Zerynthia Cerisyi ait birinci ve ikinci basamaktaki sınıflandırma süreleri Çizelge 13’te verilmiştir. Kelebeğin toplam sınıflandırma süresi 2,04 sn’dir. Diğer ailelere ait sınıflandırma denemelerinde ise süre 3 saniyenin altında kalmıştır.

Çizelge 13. Zerynthia Cerisyi ait sınıflandırma süreleri

Table 13. Classification times of Zerynthia Cerisyi

Birinci Basamak		İkinci Basamak	
Ağ	Sınıflandırma Süresi	Ağ	Sınıflandırma Süresi
Aile (DenseNet201)	1,03 sn	Papilionidae (ResNet101)	1,01 sn

Literatür incelendiğinde bu çalışma Türkiye’deki kelebek türlerinin tamamını içermesi açısından tek çalışmadır. Bunun yanı sıra Çizelge 14’te de görüleceği gibi tür, görüntü sayısı ve başarı oranı olarak gerek Türkiye’deki gerekse diğer kelebek türleri inceleyen çalışmalar ile karşılaştırıldığında kayda değer bir başarı göstermiştir. Özellikle tür-başarı ilişkisi dikkate alındığında tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 14. literatür karşılaştırma tablosu

Table 14. literature comparison chart

Yapılan Çalışmalar	Kullanılan Yöntemler	Tür Say.	Gör. Say.	Baş. Ora.(%)
Serna ve Segura, 2014	Yapay Sinir Ağları	11	92	92,25
Kang ve diğ., 2014	Yapay Sinir Ağları	15	150	80,3
Kaya, Ertuğrul ve diğ. 2015	LBP	14	140	95,71
Kaya, Kayci ve diğ., 2015	LBP ve Yapay Sinir Ağı	5	50	98
Rodner ve diğ., 2015	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet)	675	2120	55,7
Rodner ve diğ., 2015	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet)	331	2310	79,2
Carvajal ve diğ., 2016	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet, VGG16 ve VGG19)	15	2110	92
Ming ve diğ., 2017	CaffeNet	1117		95,8
Ming ve diğ., 2017	SVM	1117		94,8
Chang ve diğ., 2017	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (ResNet18, ResNet34, VGG19,	636	14270	92,6
Nie ve diğ., 2017	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet, VGGNet ve ResNet)	82		95
Xie ve diğ., 2018	Faster R-CNN (ZF)	1287	5695	59,8
Xie ve diğ., 2018	Faster R-CNN (VGG CNN M1024)	1287	5695	64,5
Xie ve diğ., 2018	Faster R-CNN (VGG16)	1287	5695	72,8
Zhu ve Spachos, 2019	Makine Öğrenmesi (SVM)	10	832	52,8
Zhu ve Spachos, 2019	Derin Öğrenme (4-Conv CNN)	10	832	98,44
Zhu ve Spachos, 2019	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (VGG19)	10	832	98,53
Ruoyan ve diğ., 2019	R-CNN	111	5695	70,4
Arzar ve diğ., 2019	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (GoogLeNet)	4	120	97,5
Lin ve diğ., 2019	S-CCNN (Skip-Connections Convolutional Neural Network)	56	173852	93,36
Antequera ve diğ., 2019	Evrişimli Sinir Ağları-COSFIRE (SVM)	7	619	96,57
Almryad ve Kutucu, 2020	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (VGG16, VGG19 ve ResNet50)	10	17769	80
Çalışma	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet, DenseNet201, ResNet18, ResNet50, ResNet101, VGG16 ve VGG19)	9 aile	67640	95,88
Çalışma	Evrişimli Sinir Ağları-Transfer Öğrenme (AlexNet, DenseNet201, ResNet18, ResNet50, ResNet101, VGG16 ve VGG19)	416	67640	91,99 ile 100

SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Birçok kaynaktan toplanarak ve düzenlenerek oluşturulan yeni veri setinde yüksek başarı gösteren ve ileriye dönük iyi bir çözüm olduğunu ispatlayan bu görsel tür sınıflandırması; kelebek türlerinin sınıflandırılmasında, zararlı kelebek türlerinin tespitinde, yaşamsal açıdan önemli kelebek türlerinin koruma altına alınmasında ve ekosistem değişikliklerinin belirlenmesinde yararlı olabilecek bir problem çözümüdür.

DeneySEL çalışmalarında önceden eğitilmiş ağlarının başarı oranının, aile sayısı dolayısıyla tür sayısı arttıkça kelebeklerin ön ve arka kanat desen benzerliğinden dolayı çok düştüğü görülmüştür. Hedeflenen başarı oranına ulaşmak amacıyla basamaklı (cascade) ağ yapısı modeli kullanılmış, bunun sonucu olarak başarı oranı yükseltilmiştir. Modelde birinci basamaktaki ailelere göre sınıflandırmada %95.88, ikinci basamaktaki tür sınıflandırmada ise %91.99 ile %100 arasında başarı oranı elde edilmiştir. Elde edilen yüksek başarı oranı kullanılan modelin benzer problemler için iyi bir çözüm olacağını göstermektedir.

Bu çalışma; probleme, veriye ve ağa uygun transfer öğrenme yöntemi seçildiğinde önceden eğitilmiş ağların bu ve benzeri problemlere iyi çözümler getireceğini göstermesi açısından önemlidir. Çalışmanın diğer önemli bir sonucu, üzerinde birçok tanımlayıcı özellik taşıyan kelebek ön ve arka kanadının, kelebek tanımlamada çok önemli rol oynadığını göstermesidir.

Çalışmanın temel amaçlarından biri, kelebek görüntülerinden kelebek türlerinin tanımında karşılaşılan veri kümesi eksikliğine veya yetersizliğine katkıda bulunmaktır. Bu amaçla Türkiye'deki 9 aile ve 416 kelebek türüne ait 13528 görüntü toplanmış, veri artırma yöntemi ile görüntü sayısı 67640'a çıkarılarak yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Çalışma sonrasında; Türkiye'deki kelebek türlerini kapsayan bir projeye çalışmanın geliştirilmesi, veri setinin daha da büyütülmesi ve kamuya açılması planlanmaktadır.

Çalışmada kullanılan ağların katman sayısı ve derinliği arttıkça ağ başarı oranı artmıştır. Ağ parametre sayısı arttıkça ise başarı oranının düştüğü gözlenmiştir. Veri boyutunun ağ parametre sayısına göre çok küçük kalması bu sonucu neden olmuştur. Ayrıca parti büyüklüğünün ağ başarı oranını etkilediği gözlenmiştir. Bu sonuçlar transfer öğrenme yönteminin kullanıldığı problem çözümlerinde dikkat edilmesi gereken unsurlardır.

Çalışma bir başlangıç çalışması olup yüksek performans gösteren ağ mimarileri ve çalışma esnasında kazanılan tecrübeler yeni proje kapsamında probleme özgü ağ tasarımının yapıldığı modelde kullanılacaktır. Yeni projede tasarım ve eğitim süreci Python programlama dili ile gerçekleştirilecektir. Proje tamamlandığında uygulamanın kullanımı için bir WEB sayfası oluşturulacak, kullanıcılar WEB sayfasına yükledikleri görüntüden kelebek aile ve türünü öğrenebilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Almryad, A.S., Kutucu, H., 2020, "Automatic identification for field butterflies by convolutional neural networks", *Engineering Science and Technology an International Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 189–195.
- Antequera, M.L., Vallina, M.L., Strisciuglio, N., Petkov, N., 2019, "Place and Object Recognition by CNN-Based COSFIRE Filters", *IEEE Access*, Vol 7, pp. 66157–66166.
- Arzar, N.N.K., Sabri, N., Johari, N.F.M., Shari, A.A., Noordin, M.R.M., Ibrahim, S., 2019, "Butterfly Species Identification Using Convolutional Neural Network (CNN)", *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Shah Alam-Malaysia*, 221–224.
- Baykal, E., Doğan, H., Ercin, M.E., Ersoz, S., Ekinci, M., 2019, "Transfer learning with pre-trained deep convolutional neural networks for serous cell classification", *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1-19.
- Brownle, J., "Machine Learning Mastery. A Gentle Introduction to Transfer Learning for Deep Learning", <https://machinelearningmastery.com/transfer-learning-for-deep-learning/>, ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020.

- Carvajal, J.A., Romero, D., Sappa, A.D., 2016, "Fine-tuning based deep convolutional networks for lepidopterous genus recognition", *In Proceedings of the Iberoamerican Congress on Pattern Recognition*, Lima-Peru, 467–475.
- Cebeci, Z., <http://www.adamerkelebek.org/MenuDetay.asp?MenuId=21&altMenuId=61>, ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020.
- Chang, Q., Qu, H., Wu, P., Yi, J., 2017, "Fine-Grained butterfly and moth classification using deep convolutional neural networks", *Semantic Scholar*.
- Chollet F., 2017, *Deep Learning with Python*, Manning Publications, New York, United States.
- Github, "Cross-Validation: Why and how to do it", <https://srikarvaka.github.io/model-evaluation/Cross-validation/>, ziyaret tarihi: 12 Ekim 2020.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., 2015, *Deep Learning*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, United States.
- Gürkan, H., Hanilçi, A., 2020 "Evrişimsel sinir ağı ve QRS imgeleri kullanarak EKG tabanlı biyometrik tanıma yöntemi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 26, No. 2, pp. 318-327.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., 2016, "Deep Residual Learning for Image Recognition", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas, United States, 770-778.
- Indolia, S., Goswami, A.K., Mishra, S.P., Asopa, P., 2018, "Conceptual Understanding of Convolutional Neural Network-A Deep Learning Approach", *Procedia Computer Science*, Vol. 132, pp. 679-688.
- Kaggle, "Stratified Shuffle Split Working with less data", <https://www.kaggle.com/viswanathanc/stratifiedshufflesplit-working-with-less-data>, ziyaret tarihi: 12 Ekim 2020.
- Kang, S.H., Cho, J.H., Lee, S.H., 2014, "Identification of butterfly based on their shapes when viewed from different angles using an artificial neural network", *Journal of Asia-Pacific Entomology*, Vol. 17, No. 2, pp. 143–149.
- Karaçetin, E., Welch, H.J., 2011, *Türkiye'deki Kelebeklerin Kırmızı Kitabı*, Doğa Koruma Merkezi, Ankara, Türkiye.
- Karaçetin, E., Welch, H.J., Turak, A., Balkız, Ö., Welch, G., 2011, *Türkiye'deki Kelebeklerin Koruma Stratejisi*, Doğa Koruma Merkezi, Ankara, Türkiye.
- Kaya, Y., Ertuğrul, Ö.F., Tekin, R., 2015, "Two novel local binary pattern descriptors for texture analysis", *Applied Soft Computing*, Vol. 34, pp. 728–735.
- Kaya, Y., Kayci, L., Uyar, M., 2015, "Automatic identification of butterfly species based on local binary patterns and artificial neural network", *Applied Soft Computing*, Vol. 28, pp. 132–137.
- Kelebek-Turk, "Türkiye'nin Kelebekleri", <https://www.kelebek-turk.com/families.php>, ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020.
- Lawrence, S., Giles, C.L., Tsoi, A.C., Back, A.D., 1997, "Face recognition: A convolutional neural-network approach", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 8, No. 1, pp. 98-113.
- Lin, Z., Jia, J., Gao, W., Huang, F., 2019, "Fine-grained visual categorization of butterfly specimens at sub-species level via a convolutional neural network with skip-connections", *Neurocomputing*, Vol. 384, pp. 295–313.
- Mash, R., Borghetti, B., Pecarina, J., 2016, "Improved Aircraft Recognition for Aerial Refueling through Data Augmentation in Convolutional Neural Networks", *12th International Symposium on Visual Computing Advances in Visual Computing*, Las Vegas, Vol. 12, pp. 113-122.
- MathWorks, <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/introduction-to-convolutional-neural-networks.html>, ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020.
- Medium, "StratifiedKFold v.s KFold v.s", <https://xzz201920.medium.com/stratifiedkfold-v-s-kfold-v-s-stratifiedshufflesplit-ffcae5bfdf>, ziyaret tarihi: 12 Ekim 2020.
- Ming, Z.A., Peng, M.P., Yu, X.T., Ning, W.J., Jin, F., Zhong, S.Z., Lei, T.Y., Qing, Y., 2017, "Automatic identification of butterfly specimen images at the family level based on deep learning method", *Acta Entomologica Sinica*, Vol. 60, pp. 1339–1348.

- Nebauer, C., 1998, "Evaluation of convolutional neural networks for visual recognition", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 9, No. 4, pp. 685- 696.
- Nie, L., Wang, K., Fan, X., Gao, Y., "Fine-grained butterfly recognition with deep residual networks: A new baseline and benchmark", *2017 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, Sydney-Australia, 1-7, 29 November-01 December 2017.
- Pan, S.J., Yang, Q., 2010, "A survey on transfer learning", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 1345-1359.
- Petit, J.C., "Inventory of the butterfly species of sangay national park-Ecuador", <http://www.sangay.eu/index.php?lang=en>, ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020
- Rodner, E., Simon, M., Brehm, G., Pietsch, S., Wägele, J.W., Denzler, J., 2015, "Fine-grained recognition datasets for biodiversity analysis", <http://www.inf-cv.uni-jena.de/fgvcbiodiv>, ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020.
- Ruoyan, Z., Cuixia, L., Shuai, Y., Xinru, F., 2019, "Butterfly Recognition Based on Faster R-CNN", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1176, No.3.
- Serna, A.H., Segura, L.F.J., 2014, "Automatic identification of species with neural networks", *PeerJ*, e563.
- Shou, J., Zhou, Y., Li, Y., 2006, "Systematic Butterfly Names of the World", *Shaanxi Science and Technology Press*, Xi'an, China.
- Theckedath, D., Sedamkar, R.R., 2020, "Detecting Affect States Using VGG16, ResNet50 and SE-ResNet50 Networks", *Springer Nature Computer Science*, Vol. 79, pp. 1-7.
- Trakel, "İl tür sayıları", <http://www.trakel.org/kelebekler/?fsx=il-tur-listesi>, ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020.
- Wang, J., Markert, K., Everingham, M., 2009, "Learning models for object recognition from natural language descriptions", *In Proceedings of the 20th British Machine Vision Conference*, London, UK.
- Wang, W., Zhang, J., Wang, F., 2019, "Attention bilinear pooling for fine-grained classification", *Symmetry*, Vol. 11, No. 8, p. 1033.
- Xie, J., Hou, Q., Shi, Y., Peng, L., Jing, L., Zhuang, F., Zhang, J., Tang, X., Xu, S., 2018, "The automatic identification of butterfly species", *Journal of Computer Research and Development*, Vol. 55, No. 8, pp. 1609-1618.
- Xin, D., Chen, Y.W., Li, J., 2020, "Fine-Grained Butterfly Classification in Ecological Images Using Squeeze-And-Excitation and Spatial Attention Modules", *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 5, p. 1681.
- Xue, A., Li, F., Xiong, Y., 2019, "Automatic Identification of Butterfly Species Based on Gray-Level Co-occurrence Matrix Features of Image Block", *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 24, No. 2, pp. 220-225.
- Yamashita, R., Nishio, M., Do, R.K.G., Togashi, K., 2018, "Convolutional neural networks: an overview and application in radiology", *Insights Imaging*, Vol. 9, pp. 611-629.
- Ye, H., Han, H., Zhu, L., Duan, Q., 2019, "Vegetable pest image recognition method based on improved VGG convolution neural network", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1237, No. 3, 032018.
- Zhao, R., Li, C., Ye, S., Fang, X., 2019, "Butterfly Recognition Based on Faster R-CNN", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1176, No. 3.
- Zhou, Y., Nejati, H., Do, T.T., Cheung, N.M., Cheah, L., 2016, "Image-based vehicle analysis using deep neural network: A systematic study", *IEEE international conference on digital signal processing*, 276-280.
- Zhu, L., Spachos, P., 2019, "Butterfly Classification with Machine Learning Methodologies for an Android Application", *2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Ottawa-Canada.



AĞIRLIK MATRİSLERİNİN 3-SD HELİKOPTERİN DDRD TABANLI KONTROL METODU ÜZERİNE ETKİLERİ

Engin Hasan ÇOPUR

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay ve Uydu Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE
ehcopur@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 17.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.05.2021)

ÖZ: Durum Değişkenine Bağlı Riccati Denklemi (DDRD) tekniği, verilen ikinci dereceden bir maliyet fonksiyonunu en aza indirecek şekilde doğrusal olmayan bir sistem sınıfı için optimale yakın bir kontrol kanunu sağlar. Doğrusal olmayan sistem (DOS) matrisleri her zaman anında hesaplanıp, DOS doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem olarak ele alınabilir ve ilgili optimal kontrol problemi her anda Doğrusal Kuadratik Regülatör (DKR) problemi olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, DKR'nin ağırlık matrisleri, DDRD denetleyicisi vasıtasıyla kapalı çevrim sistemin geçici zaman cevabını şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, üç serbestlik dereceli (3-SD) deney helikopterinin pozisyon kontrolü için DDRD tabanlı bir optimal kontrolcü tasarlandı. Deneyler, helikopterin geçici zaman cevabı üzerindeki etkilerini değerlendirilmek için farklı ağırlık matrisleriyle tekrarlandı. Deneylerin ilk aşamasında, ağırlık matrisleri sabit gerçek elemanlı köşegen matris olarak seçildi. DDRD metoduyla kontrol edilen helikopterin durumlarıyla ilişkili köşegen elemanlar, bu durumların geçici zaman cevaplarını nasıl etkilediğini incelemek için değiştirildi. İkinci aşamada, ağırlık matrisleri durum bağımlı olarak seçildi. Her iki aşamadaki deneysel sonuçların kıyaslaması, durum bağımlı ağırlık matrislerinin yerleşme zamanı ve kalıcı durum hatası gibi geçici zaman cevabının özelliklerini iyileştirme yeteneğine daha fazla sahip olduklarını ortaya çıkartmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal olmayan kontrol, DDRD kontrolü, Optimale yakın kontrol

Effects of Weighting Matrices on SDRE Based Control Method of 3-DoF Helicopter

ABSTRACT: State Dependent Riccati Equation (SDRE) technique enables a suboptimal control law for a class of nonlinear systems such that it minimizes a given quadratic cost function. A nonlinear system is treated as a linear system by being computed its nonlinear matrices at each instant of time and the optimal control problem of interest can be defined as a Linear Quadratic Regulator (LQR) problem in each instant. Therefore, the weighting matrices of LQR play an important role in shaping the transient time response of the closed-loop system by means of SDRE controller. In this study, a SDRE based optimal controller was designed for controlling the position of a 3 DOF laboratory helicopter. The experiments were repeated with different weighting matrices to evaluate their effects on the transient time response of the helicopter. In the first phase of the experiments, the weighting matrices were selected such that form diagonal matrix with constant real elements. The diagonal elements corresponding to the states of the helicopter controlled by SDRE method were changed to explore how affect the transient time responses of these states. In the second phase, the weighting matrices were selected to be state-dependent. The comparison of the experimental results in both phases reveal that the state dependent weighting matrices have more capabilities of enhancing transient time response specifications such as settling time and steady-state error.

Key Words: Nonlinear control method, SDRE control, Suboptimal control

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Durum Değişkenine Bağlı Riccati Denklemi (DDRD) tabanlı kontrol, kullanımı oldukça yaygın optimale yakın doğrusal olmayan bir kontrol tekniğidir. Çimen (2008) tarafından yapılan bir çalışmada bahsedildiği üzere, DDRD tekniği, önce bir doğrusal olmayan sistemi Durum Değişkenine Bağlı Katsayılar (DDK) matrisinde ifade etmeye ve sonra her bir örnekleme zaman adımında hesaplanan DDK matrislerini kullanan DDRD çözülerek ayarlanan durum geri beslemeli kontrol kuralının tasarlanmasına dayanmaktadır. DDRD çözümü ikinci dereceden bir maliyet fonksiyonunu durum bağımlı ağırlık matrisi ve giriş ağırlık matrisi olarak bilinen iki ağırlık matrisinin keyfi olarak seçimiyle minimize ettiğinden ağırlık matrislerinin istenilen kontrol performansını, karalılığı ve gürbüzlüğü sağlamada önemli rolleri vardır. Ağırlık matrislerinin istenilen kontrol hedeflerini başarmadaki büyük önemine rağmen, yapılan çalışmalarda DDRD metodunun hala bu matrislerin seçimi için sistematik bir yoldan yoksun olduğu ifade edilmiştir (Çimen, 2010; Çimen, 2012).

DDRD yaklaşımı, DDK parametrelendirme ve ağırlık matrislerinin keyfi seçilebilmesi sayesinde mümkün olan geniş tasarım esnekliği sağlamaktadır. DDRD yaklaşımındaki tasarım esnekliği, bu yaklaşımın farklı kontrol tasarım yöntemi ile birleştirilmesine de imkân sağlamıştır. Örneğin DDRD yöntemi Kayan Kipli Kontrol yöntemi ile birleştirilerek hem teorik hem de deneysel sonuçlar elde edilmiştir (Salamci ve Gökbilen, 2007; Durmaz ve diğ., 2012; Bilgin ve Salamci, 2014). DDRD yönteminin kullanım kolaylığı nedeniyle Model Referans Uyarlamalı Kontrol yöntemiyle birleştirilmesi sonucunda yeni kontrol yöntemleri elde edilmiş ve sonuçları yayınlanmıştır (Babaei ve Salamci, 2015; Kara ve Salamci, 2017; Babaei ve Salamci, 2018). Diğer yandan, DDK parametrelendirilmesi ve ağırlık matrisleri için verilen kararların DDRD çözümünde önemli etkileri olmakla beraber kapalı çevrim sistemin öz değerlerinin yerlerini de değiştirir. Özdeğerlerin yerleri geçici zaman cevabının karakteristiğini biçimlendirmede çok önemlidir. Ancak ağırlık matrislerinin belirlenmesinde sistematik bir metodun olmaması nedeniyle istenilen geçici zaman cevabı özelliklerini başarmak zor olabilir.

Literatürde çoğunlukla çevrimdışı algoritmalar kullanan Doğrusal Kuadratik Regülatör (DKR) tabanlı kontrol mimarilerinde ağırlık matrislerini belirlemek için bazı optimizasyon metotları mevcuttur. Örnek olarak Kukreti ve diğ. (2016) insansız bir hava taşıtının yönlendirme kuralı tasarımında DKR'nin ağırlık matrislerini ayarlamak için bir genetik algoritma kullanmışlardır. Sürekli karıştırmalı tank reaktörde sıcaklık kontrolü uygulamasında ise Mani ve diğ. (2018) DKR'nin maliyet fonksiyonundaki ağırlık matrislerinin optimal seçimi için bir parçacık sürü optimizasyonu metodu önermişlerdir. Başka bir çalışmada, Nath ve Dewan (2018) arayıcı optimizasyon metodu, öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon metodu ve yer çekimsel arama algoritması olarak bilinen üç farklı sezgisel algoritma metodunu sınırsız zamanlı sürekli DKR'deki ağırlık matrislerinin seçimi için kıyaslamışlardır. DKR ile optimal aktif yapısal kontrol için ise ağırlık matrisleri Bayesian optimizasyon metodu kullanılarak seçilmiştir (Miyamoto ve diğ., 2018). Araç süspansiyon sistemi için Das ve diğ. (2018) sonsuz ufuklu DKR tasarlamışlardır ve ağırlık matrislerini ayarlamak için bir adaptif avcı-av optimizasyon metodu önermişlerdir. Ağırlık matrislerinin kontrol sisteminin performansının iyileştirilmesinde çok büyük etkilerinin olduğu bilinmesine rağmen ağırlık matrislerinin seçimi konusunda DKR metodunda olduğu gibi somut bir metod bulunmamaktadır. Ayrıca yukarıda bahsi geçen metotlar optimal olarak DDRD metodunun ağırlık matrislerinin bulunması için sağlıklı değildir. Bunun en büyük nedeni ise DDRD uygulamasında DDK matrisleri her bir zaman anında tekrar hesaplandığından optimum ağırlık matrislerini belirlemek için optimizasyon probleminin her bir zaman anında tekrar çözümü gerekmektedir. Bu gereklilik, DDRD kontrol uygulamasının gerçek sistemlere uygulanmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu yüzden genellikle ağırlık matrisleri sabit diyagonal matrisler olarak seçilip matrislerin elemanları ise sabit gerçek sayılar olarak belirlenir.

Birçok uygulamada (Arıcan ve diğ., 2018; Kocagil ve diğ., 2018a; Kocagil ve diğ., 2018b; Copur ve diğ., 2019; Vaddi ve diğ., 2009; Xin ve Balakrishan, 2002) bu yüzden deneme-yanılma metodu ağırlık matrislerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Ağırlık matrisleri bir kere belirlendikten sonra uygulama esnasında bu matrisler sabit tutulur. Ağırlık matrislerinin belirlenmesindeki bu yaklaşım, hava uzay taşıtlarının kontrolü için de kullanılmıştır. Stansbery ve Cloutier (2000), bir uzay aracının pozisyon ve yönelim kontrorlünü ağırlık matrisleri deneme-yanılma

yoluyla sabit olarak belirlenmiş DDRD tabanlı bir kontrolcü ile sağlamışlardır. Küçük boyutlardaki insansız helikopterin kontrolünde yineleme yöntemiyle her zaman anında çözülen fark Riccati denklemi tabanlı bir doğrusal olmayan kontrolcü kullanılmıştır. Yine fark Riccati denkleminin çözümünde sabit ağırlık matrisleri kullanılmıştır (Bogdanov ve diğ., 2003). Voos (2006), bir dört rotorlu kanatsız İHA'nın kontrorlü için DDRD tabanlı kontrol kuralı kullanmış ve DDRD çözümünde ağırlık matrislerini diğer tüm çalışmalarda olduğu gibi sabit matrisler olarak almıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi DDRD tabanlı kontrolde her zaman anında sistem matrisleri değiştiğinden DDRD tekrar çözümü gerekmekte olup herhangi bir optimizasyon yöntemiyle ağırlık matrislerinin her zaman anında optimum olarak belirlenmesi gerçek zamanlı bir uygulamada mümkün olmamaktadır. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalarda sabit ağırlık matrislerinin deneme-yanılma yoluyla seçimi devam etmektedir. Halbe ve Hajek (2019) tarafından yapılan çalışmada bir helikopterin dikey, ileri ve yanal yönlerdeki ivmelerini kontrol edecek uçuş kontrolü için gerekli komutlar üretilmiştir. İvme kontrolü için komutlar DDRD tabanlı bir kontrol kuralıyla üretilmiş olup ağırlık matrisleri sabit kare matrisler olarak seçilmiştir.

Bazı kontrol uygulamalarında ise belirlenen bir şartın durumuna göre farklı sabit elemanlardan oluşan ağırlık matrislerinin de kullanıldığı görülmüştür. Batmani ve Khaloozadeh (2013) kanser tedavisinde optimum ilaç enjeksiyonu uygulaması için benzetim çalışmalarında kanserli bir kadının doğum öncesi ve sonrasında uygulanacak ilacın dozajını farklı sabit ağırlık matrisi kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Diğer taraftan bazı araştırmacılar, DDRD tabanlı kontrol uygulamalarında tasarım esnekliği sağlamlarında ötürü durum değişkenlerine bağlı ağırlık matrislerini kullanmayı tercih etmişlerdir. Kanser tedavisi için ilaç uygulamasında İtik ve diğ. (2010), ilaç enjeksiyonunu minimize ederek aşırı ilaç uygulamasının zehirli etkilerini önlemek için farklı durum değişkenlerine bağlı giriş ağırlık matrisleri seçmişlerdir. Bir robotik sistemin esnek eklem kontrolü üzerine bir çalışmada ise DDRD tabanlı kontrolcünün performansını geliştirmek için zamanla değişen ve durum değişkenlerine bağlı ağırlık matrisleri seçilmiştir (Korayem ve Nekoo, 2015). Benzer şekilde çift beslemeli indüksiyon jeneratörünün rotor tarafı konvertör kontrolü için de Qin ve Sun (2018), istenen kontrol performansını elde etmek için DDRD kontrolcüsünün ağırlık matrislerini durum değişkenlerine bağlı olarak seçmiştir.

Bu çalışmada bir DDRD tabanlı doğrusal olmayan kontrolcünün performansının ağırlık matrisleri durum değişkenlerine bağlı olarak seçildiğinde nasıl etkilendiği deneysel olarak incelenmiştir. Durum değişkenlerine bağlı ağırlık matrislerinin etkisini açık bir şekilde ortaya koymak için sabit ağırlık matrislerle tasarlanmış DDRD tabanlı kontrol kuralı ile karşılaştırılmıştır. Durum değişkenlerine bağlı ağırlık matrisleri, hata değişkenlerinin karesine bağlanmıştır. Böylece durum değişkenlerinin hızlı bir şekilde istenilen referanslara ulaşması hedeflenmiştir. Deneylerde üç serbestlik dereceli (3-SD) laboratuvar helikopterinin gezinti ve yükselme eksenlerindeki hareketlerini gerçek zamanda kontrolünün önerilen doğrusal olmayan kontrol kuralıyla ne kadar etkili kontrol edilebildiği çalışılmıştır. Üç serbestlik dereceli (3-SD) laboratuvar helikopteri tasarımı yapılan kontrol kurallarını test etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışmanın ana amacı, DDRD'yi helikopterin gezinti ve yükselme eksenlerinde önceden tanımlanmış referans yörüngelerini izlemesini sağlayacak şekilde tasarlamak ve sabit elemanlı ve durum değişkenlerine bağlı olarak seçilen ağırlık matrislerinin DDRD tabanlı kontrol kuralının kontrol performansını nasıl etkilediğini tespit etmektir. Yunuslama eksenini olarak adlandırılan üçüncü eksen bu çalışmada helikopterin eksik tahrikli yapısından ötürü dikkate alınmamıştır ve bu yüzden serbest hareket etmektedir. Bu hedefleri gerçekleştirmek için önce bir doğrusal olmayan 3-SD helikopter modeli elde edilmiştir. Sonra, durum geri beslemeli kontrol kuralının kazançlarını ayarlamak için DDRD her bir zaman anında modelin DDK matrisleri kullanılarak çözülmüştür. Tasarlanan kontrolcü, Quanser firmasına ait 3-SD helikopter deney düzeneği kullanılarak test edilmiştir. Ağırlık matrislerinin seçiminin kontrol amaçlarını yerine getirmedeki etkilerini değerlendirmek için deneyler iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada ağırlık matrisleri sabit katsayılı köşegen matrisler olarak seçilip katsayılar önceden tanımlanmış bir aralıkta değiştirilmiştir. İkinci aşamada ise ağırlık matrisleri durum bağımlı olarak seçilmiştir. Seçilen her bir çift için bir adet deney yapılmıştır ve sonuçlar geçici zaman cevabının özelliklerinin tespiti için önceden belirlenen ölçütler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda ağırlık matrislerinin seçiminin kalıcı durum hatası, maksimum aşma ve yerleşme zamanı gibi

bazı geçici zaman özelliklerini değiştirmede çok etkili olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca durum bağımlı ağırlık matrislerinin yerleşme zamanı ve kalıcı durum hatası gibi geçici zaman cevabının özelliklerini iyileştirme daha başarılı oldukları anlaşılmıştır. Ayrıca daha önceki yapılmış bir çalışmada sabit ağırlık matrisleriyle tasarlanan DDRD tabanlı kontrolcü klasik bir DKR ile karşılaştırılmış olup deneysel sonuçlar, DDRD tabanlı kontrolcünün daha düşük maliyet fonksiyonu değeri ürettiğini ve yerleşme zamanının DKR'e göre daha az olduğunu göstermiştir. Ancak çalışmada geçici zaman cevabını iyileştirilmesi konusunda herhangi bir yöntem önerilmemiştir. Bu çalışmada 3-SD helikopterin geçici zaman cevabının değişken ağırlık matrisleri kullanılarak çözülen DDRD tabanlı kontrol uygulamasıyla iyileştirilebileceği gösterilmiştir (Arıcan ve diğ., 2018).

Bu makale aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir: Birinci bölümde, DDRD tabanlı kontrol tekniğinin genel çerçevesi sunulmaktadır. İkinci bölümde, deney düzeneğinin modeli, takip hedefine ulaşmak için DDRD tasarım yöntemiyle birlikte sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, deneysel sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

DDRD TABANLI OPTIMAL KONTROLCÜ TASARIMI (SDRE BASED OPTIMAL CONTROLLER DESIGN)

Aşağıdaki gibi doğrusal olmayan bir sistem ele alınsın.

$$\dot{x} = f(x) + B(x)u(t), x(0) = x_0 \quad (1)$$

Bu sistemde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ durum değişkenlerini içeren vektörü, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ giriş vektörünü, $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ birinci mertebeden türevlenebilir fonksiyonu ve $B: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ ise, $B(x) \neq 0 \forall x$ olmak üzere, matris değerli sürekli bir fonksiyonu ifade etmektedir. Orijinin $u(t) = 0$ ile Eş. 1'deki doğrusal olmayan sistemin denge noktası olması şartıyla genişletilmiş doğrusallaştırma yaklaşımı kullanılarak $f(x)$ çarpanlarına ayrılıp aşağıdaki formda elde edilebilir.

$$f(x) = A(x)x \quad (2)$$

Burada $A(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ doğrusal olmayan matris değerli bir fonksiyondur. Bu sayede Eş. 1'deki sistem bir matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u(t) \quad (3)$$

Burada $A(x)$ ve $B(x)$ DDK matrisleridir ve Eş. 3'teki DDK matris formu her zaman anında $A(x)$ ve $B(x)$ matrislerinin hesaplanmasıyla doğrusala benzer bir DDK yapısı gibi düşünülebilir. Böylece her zamana anında hesaplanan $A(x)$ ve $B(x)$ matrislerinin değerleriyle doğrusal ve zamanla değişmeyen kontrol metotlarından birisi kullanılarak aşağıdaki durum geri beslemeli kontrol kuralı tasarlanabilir.

$$u(x) = -K(x)x \quad (4)$$

Burada $K(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m \times n}$ durum geri beslemeli kontrol kazanç matrisini ifade etmektedir. Eş. 3'teki DDK'lı doğrusal olmayan sistemi asimptotik kararlı yapmak için DDRD tekniği $K(x)$ matrisini efektif ve sistematik bir şekilde aşağıdaki gibi hesaplanabilmesini sağlar.

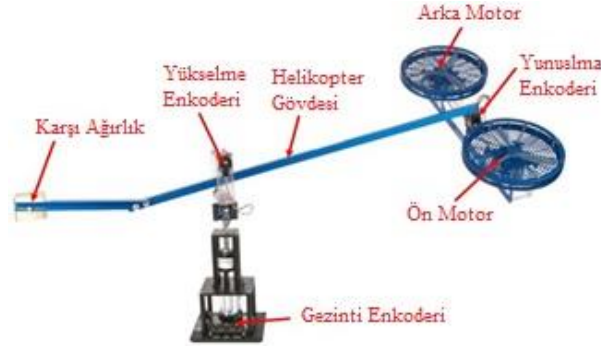
$$K(x) = R^{-1}(x)B^T(x)P(x) \quad (5)$$

Burada $P(x)$ pozitif tanımlı simetrik bir matrisi ve aşağıda verilen cebirsel DDRD'nin çözümü ifade etmektedir.

$$P(x)A(x) + A^T(x)P(x) - P(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)P(x) = -Q(x) \quad (6)$$

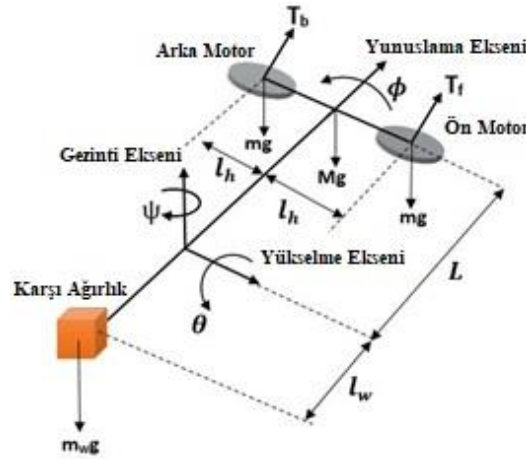
3-SD HELİKOPTER MODELİ VE DDRD KONTROLÇÜ TASARIMI (3-DOF HELICOPTER MODEL AND SDRE CONTROLLER DESIGN)

Şekil 2’de gösterilen deney düzeneği Quanser firması tarafından tandem rotorlu helikopterin dinamiğini taklit etmek ve kontrol kuraları geliştirmek için üretilmektedir. Matematiksel modelini elde etmek için helikopterin gövdesine etkiyen kuvvetler ve momentler tespit edilmiştir ve Şekil 3’de helikopterin serbest cisim diyagramı (SCD) gösterilmiştir.



Şekil 2. 3-SD helikopter

Figure 2. 3-DOF helicopter



Şekil 3. 3-SD helikopterin SCD

Figure 3. Free-body diagram of 3-DOF Helicopter

Gövdeyi oluşturan kolun sonunda bulunan ön ve arka DC motorlarla üretilen itme kuvveti sayesinde helikopter yükselme, yunuslama ve gezinti ekseninde dönebilmektedir. Ancak sahip olduğu eksik tahrik özelliği yüzünden çoğunlukla helikopterin gezinti ve yükselme eksenindeki dönüşleri kontrol edilirken yunuslama eksenindeki dönüşleri serbest hareket etmektedir. Eksenlerdeki dönüşler yüksek doğrulukla üç adet enkoder ile ölçülmektedir. Şekil 3’deki SD kullanılarak Ishutkina (2004) tarafından elde edilen doğrusal olmayan model aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta} &= -d_1 \dot{\theta} - d_2 \sin \theta + d_3 \tau_{coll} \cos \phi \\
 \ddot{\phi} &= -b_1 \dot{\phi} - b_2 \sin \phi - b_3 \tau_{cyc} \\
 \ddot{\psi} &= -a_1 \dot{\psi} - a_2 (\alpha \tau_{coll} + 1) \sin \phi \\
 \dot{\tau}_{cyc} &= -c_1 \tau_{cyc} + 0.5 c_2 (V_b - V_f) \\
 \dot{\tau}_{coll} &= -e_1 \tau_{coll} + 0.5 e_2 (V_b + V_f)
 \end{aligned} \quad (11)$$

Burada θ , ϕ ve ψ sırasıyla yükselme, yunuslama ve gezinti eksenleri etrafındaki dönüşleri ifade etmektedir. Yuvarlanma momenti (τ_{cyc}) ve yükselme momenti (τ_{coll}); helikopterin yükselme, yunuslama

ve gezinti eksenleri etrafındaki hareketlerini kontrol etmektedir. Eş. 11'deki helikopter modelinin ikinci dereceden diferansiyel denklemleri helikopterin dönüş hareketlerini göstermektedir. Birinci dereceden diferansiyel denklemler ise ön ve arka motorların giriş gerilimleriyle, sırasıyla V_f ve V_b , yuvarlanma ve yükselme momentleri arasındaki dinamik ilişkiyi göstermektedir. Eş. 11'deki helikopter modeline ait parametreler CIFER gibi bir sistem tanımlama metodu kullanılarak belirlenebilir. Ishutkina [25] tarafından elde edilmiş helikopter modelinin parametreleri Çizelge 1'de verilmiş olup Eş. 11'deki helikopter modeli için kullanılmıştır.

Çizelge 1. Helikopter modelinin parametre değerleri

Table 1. Parameter values of the helicopter model

Parametre	Değer	Parametre	Değer
a_1	0.2517	d_1	0.1011
a_2	0.2105	d_2	0.5040
b_1	0.3290	d_3	1.3400
b_2	1.5664	e_1	6.1600
b_3	16.2000	e_2	1.0000
c_1	7.3200	α	4.0000
c_2	1.0000		

Eş. 11'deki doğrusal olmayan model durum-uzay modeli formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_4 \\
 \dot{x}_2 &= x_5 \\
 \dot{x}_3 &= x_6 \\
 \dot{x}_4 &= -d_1 x_4 - d_2 \sin x_1 + d_3 x_8 \cos x_2 \\
 \dot{x}_5 &= -b_1 x_5 - b_2 \sin x_2 - b_3 x_7 \\
 \dot{x}_6 &= -a_1 x_6 - a_2 (\alpha x_8 + 1) \sin x_2 \\
 \dot{x}_7 &= -c_1 x_7 - 0.5c_2 u_1 + 0.5c_2 u_2 \\
 \dot{x}_8 &= -e_1 x_8 + 0.5e_2 u_1 + 0.5e_2 u_2
 \end{aligned} \tag{12}$$

Eş. 12'deki durum değişkenleri aşağıdaki durum vektörü formunu oluşturmaktadır.

$$x = [\theta \quad \phi \quad \psi \quad \dot{\theta} \quad \dot{\phi} \quad \dot{\psi} \quad \tau_{cyc} \quad \tau_{coll}] \tag{13}$$

Ayrıca giriş vektörü de aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$u = [u_1 \quad u_2]^T = [V_f \quad V_b]^T. \tag{14}$$

Böylece Eş. 12'de durum-uzay modeli aşağıdaki DDK matrisleriyle tekrar üretilebilir.

$$A(x) = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 d_2 L(x) & 0 & 0 & -d_1 & 0 & 0 & 0 & N(x) \\
 0 & b_2 M(x) & 0 & 0 & -b_1 & 0 & -b_3 & 0 \\
 0 & H(x)M(x) & 0 & 0 & 0 & -a_1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_1
 \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$B(x) = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5c_2 & 0.5c_2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5e_2 & 0.5e_2
 \end{bmatrix} \tag{16}$$

Burada, $L(x) = -x_1^{-1} \sin x_1$, $N(x) = -d_3 \sin x_2$, $M(x) = -x_2^{-1} \sin x_2$ ve $H(x) = a_2(\alpha x_8 + 1)$. Eş. 6'daki DDRD'nin çözümünün varlığını garanti etmek için $\{A(x), B(x)\}$ çiftinin her zaman anında kararlı kılınabilir ve kontrol edilebilir olduğu sayısal olarak tespit edilebilir.

DDRD Kontrolcü Tasarımı (SDRE Controller Design)

Bu çalışmada helikopter, hem gezinti hem de yükselme eksenlerinde daha önce tasarlanmış yörüngeyi takip etmek zorundadır. Takip görevini başarmak için 3-SD helikopterin hata dinamiğini gösteren genişletilmiş durum-uzay formuna ihtiyaç duyulmaktadır. Hata dinamiği aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\dot{e} = \hat{A}(e)e + \hat{B}(e)u \quad (17)$$

Burada hata dinamiğinin durum vektörü

$$e = [\hat{e} \quad \bar{e}]^T$$

olup

$$\hat{e} = [\theta - \theta_d \quad \phi \quad \psi - \psi_d \quad \dot{\theta} \quad \dot{\phi} \quad \dot{\psi} \quad \tau_{cyc} \quad \tau_{coll}]^T$$

ve

$$\bar{e} = \int [\theta - \theta_d \quad \psi - \psi_d]^T dt$$

vektörlerinden oluşmaktadır. Verilen

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

matrisi ile Eş. 17'deki hata dinamiğinin matrisleri aşağıdaki elde edilmiştir.

$$\hat{A}(e) = \begin{bmatrix} A(e) & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \text{ ve } \hat{B}(e) = \begin{bmatrix} B(e) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Böylece Eş. 17'deki hata dinamiğine tabi olan

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \{e^T(t)Q(e)e(t) + u^T(t)R(e)u(t)\} dt \quad (19)$$

maliyet fonksiyonunu minimize ederken $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ sağlayan kontrol girişi aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$u = -K(e)e. \quad (20)$$

DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bir önceki bölümde geliştirilen DDRD kontrol tekniği, 3-SD helikopter düzeneğinde test edilmiştir. Geliştirilen kontrolcü, Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş ve Quarc gerçek zamanlı kontrol yazılımı sayesinde, Simulink ortamındaki kontrolcü 3-SD helikopterin kontrolünde gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Helikopterin açıl pozisyonları yüksek çözünürlüklü enkoderler ile ölçülmektedir. Hız verileri ise pozisyon ölçümlerinden elde edilmektedir. Deneylerde yükselme, yunuslama ve gezinti eksenindeki başlangıç açıl pozisyonları sırasıyla $\theta(0) = -15^\circ$, $\phi(0) = 0$ ve $\psi(0) = 0$ olarak ayarlanmıştır. Kontrol edilen durum değişkenleri sadece helikopterin gezinti ve yükselme açıları olduğundan gezinti

için referans değeri ψ_d , 40 s için 30° olarak yükselme için ise referans değeri $\theta_d = 0^\circ$ olarak ayarlanmıştır. Deneyler 70 s sürmüştür. Takip edilmek istenilen yörüngeler Şekil 4'te verilmektedir.

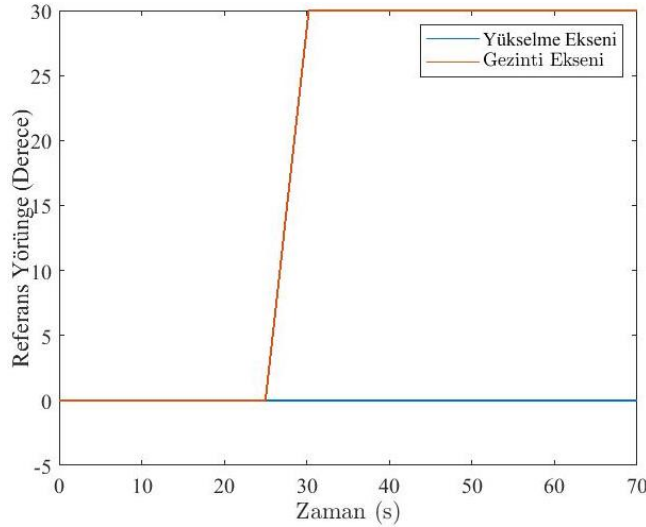
Deneme-yanılma metodu kullanılarak Eş. 19'daki DDRD tabanlı kontrol kuralı tasarlamak için ağırlık matrisleri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$Q = \text{diag}(15,30,30,1,0.5,68,1,1,15,20) \quad (21)$$

$$R = \text{diag}(1,1)$$

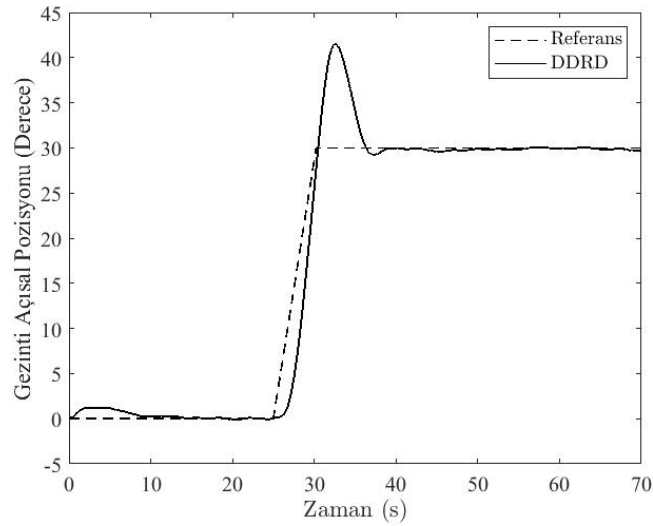
Şekil 5 ve Şekil 6'da Eş. 21'de verilen ağırlık matrisleri 3-SD helikopterin gezinti ve yükselme takipleri sırasıyla gösterilmiştir.

Deneylerin ilk aşamasında Q ağırlık matrisindeki bir değişimin geçici zaman cevabı karakteristiği üzerindeki etkilerini araştırmak için Eş. 21'de verilen her bir deneyde Q matrisinin sadece bir elemanı değiştirilmiştir. Q matrisinin $Q(1,1)$ ve $Q(3,3)$ elemanları, yükselme ve gezinti eksenlerindeki geçici zaman cevabının yerleşme zamanıyla yakından ilgilidir. Ayrıca yükselme ve gezinti eksenlerindeki kalıcı durum hatasını azaltmak için Q matrisinin $Q(9,9)$ ve $Q(10,10)$ elemanları değiştirilebilir. Ancak tüm durumlarda anlamlı bir karşılaştırma yapmak için R ağırlık matrisi değiştirilmemiştir.



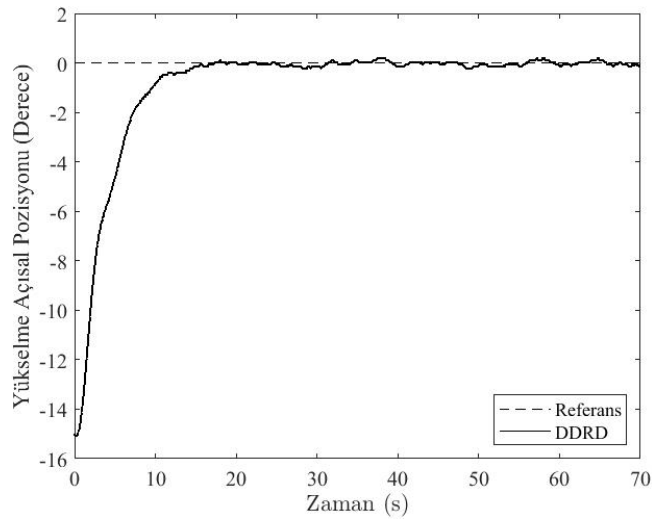
Şekil 4. 3-SD helikopter için gezinti ve yükselme eksenlerindeki istenilen yörüngeler

Figure 4. Desired trajectories for 3-DOF helicopter in the travel and elevation axes



Şekil 5. Eş. 21'deki DDRD kontrol edilen 3-SD helikopterin gezinti tepkisi

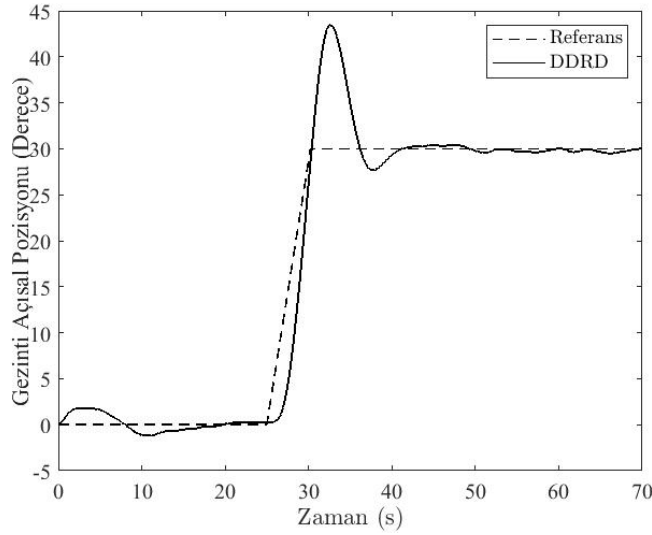
Figure 5. Travel response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with Eq. 21



Şekil 6. Eş. 21'deki DDRD kontrol edilen 3-SD helikopterin yükselme tepkisi

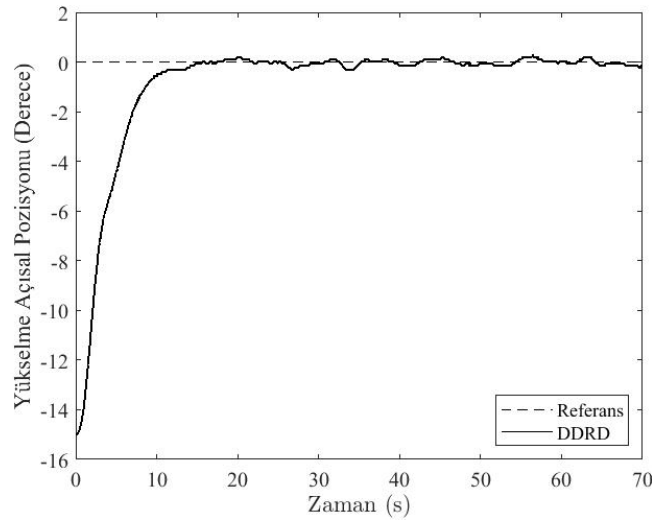
Figure 6. Elevation response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with Eq. 21

Şekil 7, Q ağırlık matrisinin $Q(3,3)$ elemanının daha küçük seçilmesi halinde 3-SD helikopterin gezinti tepkisinin nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 7'den anlaşılacağı gibi yerleşme zamanı artmıştır. Diğer taraftan Q ağırlık matrisinin yükselme eksenindeki geçici zaman tepkisi üzerindeki etkisini incelemek için Q matrisinin köşegen elemanlarının ilki ayarlanabilir. Q matrisinin $Q(1,1)$ elemanı bir olduğundaki durum Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 6 ile Şekil 8'in karşılaştırılması yerleşme zamanının bir önceki durum gibi arttığını ortaya koymuştur.



Şekil 7. $Q(3,3) = 1$ olduğu DDRD ile kontrol edilen 3-SD helikopterin gezinti tepkisi

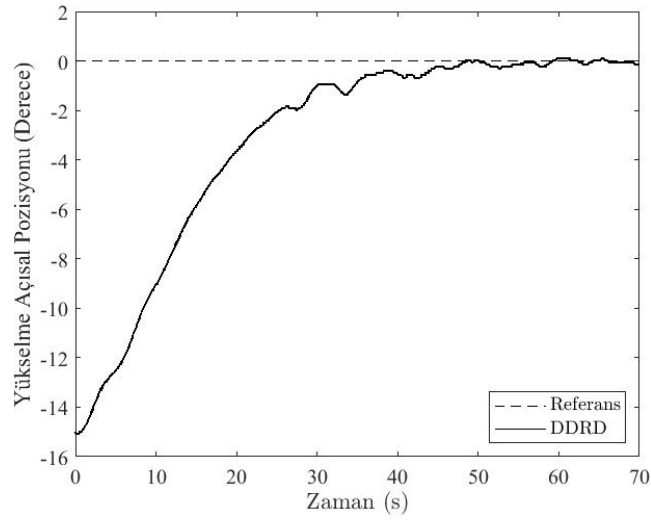
Figure 7. Travel response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with $Q(3,3) = 1$



Şekil 8. $Q(1,1) = 1$ olduğu DDRD ile kontrol edilen 3-SD helikopterin yükselme tepkisi

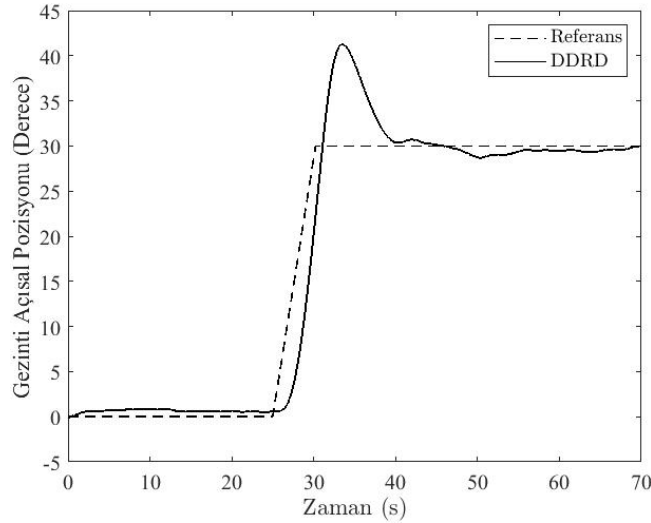
Figure 8. Elevation response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with $Q(1,1) = 1$

Yükselme ve gezinti cevaplarındaki kalıcı durum hatası Q ağırlık matrisindeki $Q(9,9)$ ve $Q(10,10)$ elemanları ayarlanarak geliştirilebilir. Şekil 9 açık bir şekilde $Q(9,9)$ elemanı küçüldükçe daha büyük kalıcı durum hatası elde edildiğini göstermektedir. Benzer bir yorum gezinti cevabındaki kalıcı durum hatası için de yapılabilir. Şekil 10'dan da görüleceği üzere Q ağırlık matrisinin $Q(10,10)$ elemanının değerindeki bir azalma gezinti cevabındaki kalıcı durum hatasını artırır.



Şekil 9. $Q(9,9) = 1$ olduğu DDRD ile kontrol edilen 3-SD helikopterin yükselme tepkisi

Figure 9. Elevation response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with $Q(9,9) = 1$



Şekil 10. $Q(10,10) = 1$ olduğu DDRD ile kontrol edilen 3-SD helikopterin gezinti tepkisi

Figure 10. Travel response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with $Q(10,10) = 1$

Diğer bir geçici zaman karakteristiği olan maksimum aşma için ise sabit bir Q ağırlık matrisinin gezinti eksenindeki maksimum aşmayı azaltmaya yetmediği Şekil 5, Şekil 7 ve Şekil 10 incelenerek söylenebilir. Dolayısıyla çalışmanın 2. aşamasında durum değişkenlerine bağlı bir ağırlık matrisi oluşturularak deneyler tekrarlanmıştır. Optimal kontrol kuralının tasarımında helikopter sisteminin Eş. 17'deki hata dinamiği kullanıldığı için ağırlık matrisleri hata dinamiğinin durum değişkenlerine bağlı olarak seçilmiştir. Deneylerin ilk aşamasında kullanılan ve Şekil 4'te gösterilen referans yörüngelerin aynıları deneylerin 2. aşamasında da sağlıklı bir karşılaştırma yapmak için aynen kullanılmıştır. Şekil 4'teki takip edilmek istenilen referanslar tekrar incelendiğinde yükselme ekseninin referansı deney boyunca değişmezken gezinti eksenindeki referans 25'inci s'de değişmektedir. Bu yüzden ağırlık matrisleri Eş. 17'deki hata dinamiğinin durum değişkeni olan ve \hat{e}_3 ile gösterilen $\psi_d - \psi$ hata değişkenine bağlı olarak seçilmiştir. \hat{e}_3 bağlı olarak seçilen ağırlık matrisleri sayesinde helikopterin geçici zaman cevapları iyileştirilmek istenmiştir. Q ve R ağırlık matrislerinin yarı pozitif tanımlı ve pozitif tanımlı matris olmalarını garanti etmek için matris elemanları, \hat{e}_3^2 ile oluşturulmuştur. Sonuç olarak 2'nci aşama deneyler için seçilen R ağırlık matrisi

$$R = \text{diag}(0.4\hat{e}_3^2, 0.4\hat{e}_3^2) \quad (22)$$

şeklinde bir köşegen kare matristir.

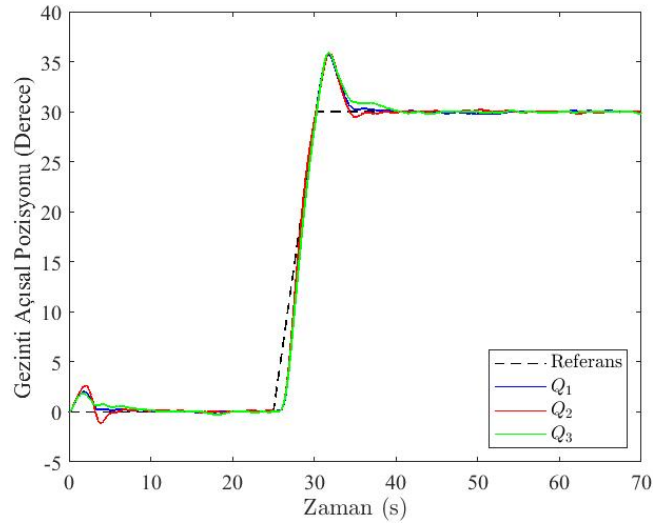
Deneylerde kullanılan durum değişkenlerine bağlı Q ağırlık matrisi ise 3 farklı tipte tasarlanmış olup aşağıda verilmiştir. Helikopterin gezinti ekseninde bir referansı takip etmesi istendiğinden Q ağırlık matrisinin gezinti durumuyla ilgili elemanlarının (\hat{e}_3 ve $\int \hat{e}_3$) kontrol performansına doğrudan etki edecekleri dikkate alınarak bu ağırlık matrisleri diyagonal olmayan şekilde belirlenmiştir.

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 300 + \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 + \hat{e}_3^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 + \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 + \hat{e}_3^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 200 + \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 + \hat{e}_3^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 + \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 + \hat{e}_3^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 + \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 + \hat{e}_3^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 + \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{e}_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 + \hat{e}_3^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

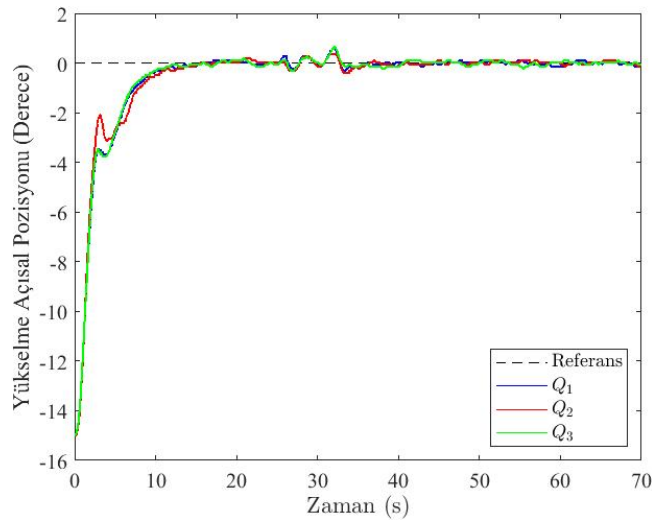
Eş. 23, Eş. 24 ve Eş. 25'te verilen farklı Q ağırlık matrisleri ile Eş. 22'de verilen R ağırlık matrisi ile elde edilen helikopterin gezinti eksenindeki zaman cevabı Şekil 11'de gösterilmiştir. Her bir ağırlık matrisiyle elde edilen cevaplar karşılaştırıldığında durağan durum cevapları birbirlerine oldukça yakın olmakla birlikte geçici zaman cevaplarında az da olsa bazı farklılıklar mevcuttur. Özellikle yerleşme zamanı üzerinde durum değişkenine bağlı ağırlık matrislerinin etkili olduğu söylenebilir. Q_1 ağırlık matrisi kullanılarak tasarlanan DDRD kontrolcüsü helikopterin daha kısa sürede denge noktasına gelmesini sağlarken Q_3 ağırlık matrisiyle diğerlerine kıyasla en uzundur. Ayrıca Q_2 ağırlık matrisiyle yapılan kontrolde ise geçici zaman cevabında dikkat çeken bir minimum alt tepe değeri (undershoot) gözlemlenmiştir.



Şekil 11. \hat{e}_3 durum değişkenine bağlı farklı ağırlık matrisleri kullanan DDRD ile kontrol edilen 3-SD helikopterin gezinti tepkisi

Figure 11. Travel response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with different weighting matrices depending on the state variable \hat{e}_3

Şekil 12’de ise helikopterin üç farklı Q ağırlık matrisi ile elde edilen yükselme eksenindeki zaman cevapları gösterilmiştir. Sonuçlar her bir ağırlık matrisinin istenilen yükselme açısı θ_d sağlama konusunda oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. 30’uncu s civarında gözlemlenen ve daha sonra kaybolan salınımlar ise 25’inci s’de gezinti ekseninde helikopterin 30° değerinde bir dönüş gerçekleştirmesinin istenmesidir. Helikopterin gezinti ekseninde bu dönüşü gerçekleştirmesiyle yani geçici zaman cevabı sona erdikten sonra salınımlar da kaybolmuştur.



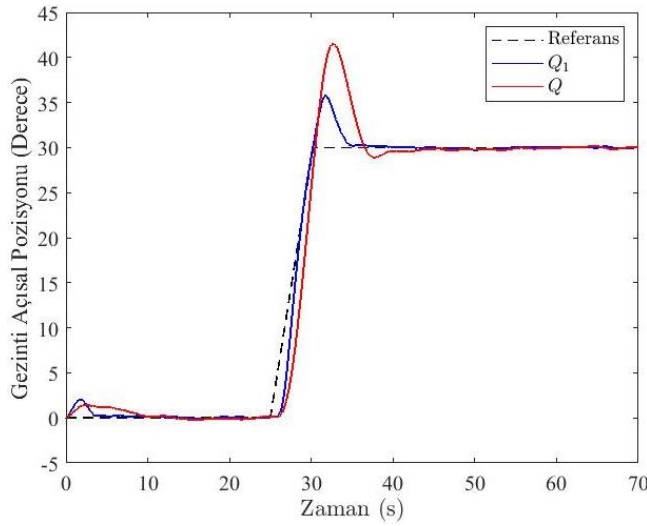
Şekil 12. \hat{e}_3 durum değişkenine bağlı farklı ağırlık matrisleri kullanan DDRD ile kontrol edilen 3-SD helikopterin yükselme tepkisi

Figure 12. Elevation response of the 3-DOF helicopter controlled by SDRE with different weighting matrices depending on the state variable \hat{e}_3

Ağırlık matrislerinin hata dinamiğinin durum değişkenlerine bağlanarak elde edilmek istenen daha önce de bahsedildiği gibi sistemin geçici zaman cevabını iyileştirmek içindir. İstenilen performansın sağlanıp sağlanmadığını incelemek için 1. aşama deneylerden Eş. 21 kullanılarak elde edilen sonuçlar ile Eş. 22 ve Eş. 23 kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gezinti ve yükselme eksenlerinde elde edilen zaman cevapları sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14’te gösterilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde durum değişkenine bağlı ağırlık matrisiyle gezinti ekseninde istenilen cevaba daha yakın bir cevap elde edildiği

gözlemlenmiştir. Helikopterin 25 ve 30 s arasında sabit bir eğimle istenilen gezinti eksenindeki pozisyona ulaşması beklenmektedir. Sabit ağırlık matrisleriyle bunun sağlanamadığı Şekil 13'te açık bir şekilde görülmektedir. Bunun yanı sıra durum değişkenine bağlı ağırlık matrisleriyle bu eğimli olarak artması istenilen dönüş daha doğru bir şekilde sağlanmaktadır.

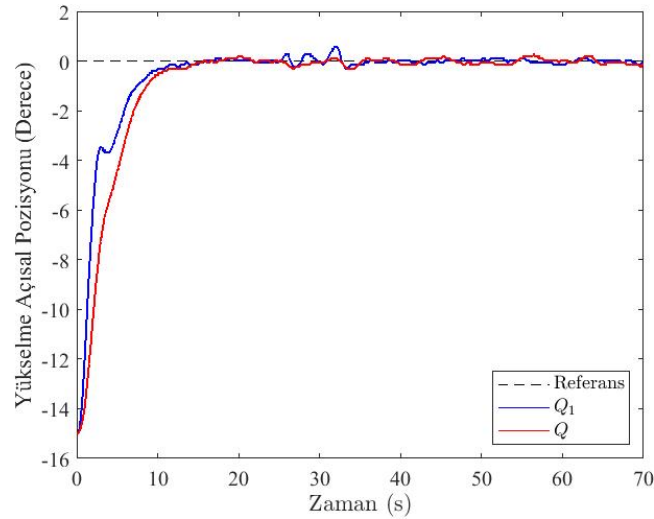
DDR kontrolcüsü, yükselme ekseninde 3-SD helikopteri istenilen açısal pozisyonda tutmaya çalışırken gezinti ekseninde istenilen bir açısal pozisyona ulaşması istendiğinde sistemin az tahrikli olması nedeniyle bir maksimum aşma kaçınılmaz olarak meydana gelmektedir. Bu maksimum aşma Şekil 13'te de görüldüğü gibi sabit ağırlık matrisleriyle %33,3 gibi bir değer ulaşmaktadır. Durum değişkenine bağlı ağırlık matrislerinin bu yüksek aşma değerini düşürmek için etkili olduğu deney sonucuyla açık bir şekilde görülmektedir çünkü Şekil 13'teki Q_1 ağırlık matrisiyle elde edilen cevabın maksimum aşma değerine bakıldığında %16,7 bir maksimum aşma elde edilmiştir. Bu da maksimum aşma için yaklaşık %50 oranında iyileştirme sağlamak anlamına gelmektedir.



Şekil 13. Eş. 22 ve Eş. 23'te verilen ağırlık matrisleri ile Eş. 21'de verilen ağırlık matrislerinin 3-SD helikopterin gezinti tepkisi üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması

Figure 13. A comparison of the effects of the weighting matrices given by Eq. 21 and the weighting matrices given by Eq. 22 and Eq. 23 on the travel response of the 3-DOF helicopter

Yükselme eksenindeki zaman cevabında da iyileştirme sağlandığı Şekil 14'te görülmektedir. Durum değişkenine bağlı ağırlık matrisiyle kontrol edilen helikopterin kalıcı zaman cevabına daha çabuk ulaştığı görülmektedir. Ancak gezinti eksenine 25'inci s'de verilen basamak şeklinde referans giriş nedeniyle oluşan salınımlar sabit ağırlık matrisleriyle kontrol edilen helikopterin yükselme eksenindeki zaman cevabında diğerine göre daha azdır.



Şekil 14. Eş. 22 ve Eş. 23'te verilen ağırlık matrisleri ile Eş. 21'de verilen ağırlık matrislerinin 3-SD helikopterin yükselme tepkisi üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması

Figure 14. A comparison of the effects of the weighting matrices given by Eq. 21 and the weighting matrices given by Eq. 22 and Eq. 23 on the elevation response of the 3-DOF helicopter

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Durum geri beslemeli kontrol kazanç matrisini hesaplamak için DDRD yaklaşımında ağırlık matrisleri kullanılmaktadır. Dolayısıyla kapılı çevrim sistemin öz değerlerinin yerleri büyük oranda ağırlık matrislerinin seçimine bağlıdır. DDRD tabanlı kontrol tekniğinin önemine rağmen istenilen kontrol performansını elde etmek için ağırlık matrisleri birçok durumda deneme-yanılma yoluyla seçilir. Bu yüzden bu çalışma, ağırlık matrislerinin seçiminin 3-SD helikopter sisteminin geçici zaman cevabı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır.

Deneyel çalışmalar göstermiştir ki eğer ağırlık matrisleri sabit köşegen bir matris formunda seçilirse Q ağırlık matrisinin birinci ve üçüncü elemanlarındaki azalma sırasıyla yükselme ve gezinti eksenlerindeki yerleşme zamanını artırmaktadır. Ayrıca helikopterin cevabındaki kalıcı durum hatasını azaltmak için Q ağırlık matrisinin son iki elemanı artırılmalıdır. Ancak köşegen ve sabit bir ağırlık matrisinin kullanımı tüm durumlarda gezinti eksenindeki maksimum aşmayı azaltmak için yeterli değildir. Bu yüzden deneyel çalışmanın ikinci aşamasındaki durum değişkenlerine bağlı bir ağırlık matrisi kullanılarak deneyler yenilenmiştir. Sonuçlar sabit bir matris yerine durum değişkenlerine bağlı bir matrisin maksimum aşmayı azaltmak için kullanılabileceğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. tarafından desteklenmiştir (DKTM/2015/07).

KAYNAKLAR (REFERENCES)





- Arıcan, A.C., Özcan, S., Kocagil, B.M., Guzey, U.M., Copur, E.H., Salamci, M.U., "Linear and Nonlinear Optimal Controller Design for a 3 DOF Helicopter", *19th International Carpathian Control Conference*, Szilvasvarad, Hungary, 185-190, 28-31 Mayıs 2018.
- Babaei, N., Salamci, M.U., 2015, "Personalized Drug Administration for Cancer Treatment Using Model Reference Adaptive Control", *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 371, pp. 24-44.
- Babaei, N., Salamci, M.U., 2018, "Controller Design for Personalized Drug Administration in Cancer Therapy: Successive Approximation Approach", *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 39, No. 2, pp. 682-719.

- Batmani, Y., Khaloozadeh H., 2013, "Optimal Chemotherapy in Cancer Treatment: State Dependent Riccati Equation Control and Extended Kalman Filter", *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 34, ss. 562-577.
- Bilgin, N., Salamci, M.U., "Sliding Mode Control Design for Nonlinear Systems without Reaching Phase and Its Applications to A Flexible Spacecraft", *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Copenhagen, Denmark, 1-9, 25-27 Haziran 2014.
- Bogdanov, A., Carlsson, M., Harvey, G., Hunt, J., Kieburz, D., van der Merwe, R., & Wan, E., "State-Dependent Riccati Equation Control of a Small Unmanned Helicopter", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Austin, Texas, 11-14 Ağustos 2003.
- Çimen, T., "State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control: A Survey", *Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, 3761-3775, 6-11 Temmuz 2008.
- Çimen, T., 2010, "Systematic and Effective Design of Nonlinear Feedback Controllers via the State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Method", *Annual Reviews in Control*, Vol. 34, No. 1, pp. 32-51.
- Çimen, T., 2012, "Survey of State-Dependent Riccati Equation in Nonlinear Optimal Feedback Control Synthesis", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 35, No. 4, pp. 1025-1047.
- Copur, E.H., Arican, A.C., Ozcan, S., Salamci, M.U., 2019, "An Update Algorithm Design Using Moving Region of Attraction for SDRE Based Control Law", *Journal of The Franklin Institute*, Vol. 356, No. 15, pp. 8388-8413.
- Das, R.R., Elumalai, V.K., Subramanian R.G., Kumar, K.V.A., 2018, "Adaptive Predator-Prey Optimization for Tuning of Infinite Horizon LQR Applied to Vehicle Suspension System", *Applied Soft Computing*, Vol. 72, pp. 518-526.
- Durmaz, B., Özgören, M.K., Salamci, M.U., 2012, "Sliding Mode Control for Non-linear Systems with Adaptive Sliding Surfaces", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 34, No. 1, pp. 56-90.
- Halbe, O., Hajek, M., 2019, "Online Waypoint Trajectory Generation Using State-Dependent Riccati Equation", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 42, No. 12, pp. 2687-2693.
- Ishutkina, M.A., 2004, *Design and Implementation of a Supervisory Safety Controller for a 3-DOF Helicopter*, Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, Massachusetts, USA.
- İtik, M, Salamcı, M.U., Banks S.P., 2010, "SDRE optimal control of drug administration in cancer treatment", *Turkish Journal of Electrical Engineering Computer Sciences*, Vol. 18, No. 5, pp. 715-729.
- Kara, F., Salamci, M.U., 2017, "Model Reference Adaptive Sliding Surface Design for Nonlinear Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, No. 1, pp. 611-624.
- Kocagil B.M., Ozcan S., Arican A.C., Guzey U. M., Copur E.H., Salamci M.U., "MRAC of a 3-DoF Helicopter with Nonlinear Reference Model", *26th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Zadar, Croatia, 278-283, 19-22 Temmuz 2018.
- Kocagil, B.M., Ozcan, S., Arican, A.C., Guzey, U.M., Copur, E.H., Salamci, M.U., "Adaptive Control of a 3 DoF Helicopter with Linear and Nonlinear Reference Models", *6th International Conference on Control Engineering & Information Technology*, Istanbul, Turkey, 1-6, 25-27 Ekim 2018.
- Korayem, M.H., Nekoo, S.R., 2015, "Finite-time state-dependent riccati equation for time-varying nonaffine systems: rigid and flexible joint manipulator control", *ISA Transactions*, Vol. 54, pp. 125-144.
- Kukreti, S., Kumar, M., Cohen, K., "Genetically Tuned LQR Based Path Following for UAVs under Wind Disturbance", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Arlington, VA, 267-274, 7-10 Haziran 2016.
- Mani, G., Sivaraman, N., Sanjeevikumar, P., 2018, "Particle Swarm Optimization-Based Closed-Loop Optimal State Feedback Control for CSTR", *Advances in Systems, Control and Automation*, Editör: Konkani A., Bera R., Paul S., Springer, Singapore, 469-479.

- Miyamoto, K., Shec J., Satod D., Yasuo, N., 2018, "Automatic Determination of LQR Weighting Matrices for Active Structural Control", *Engineering Structures*, Vol. 174, pp. 308-321.
- Nath K., Dewan L., "Heuristic Optimization Based Choice of LQR Weighting Matrices for A Rotary Inverted Pendulum", *IEEE International Conference on Recent Trends in Electrical, Control and Communication*, Chennai, India, 269-274, 20-22 Mart 2018.
- Qin., Sun H., 2018, "State Dependent Riccati Equation Based Rotor-Side Converter Control for Doubly Fed Wind Generator", *IEEE Access*, Cilt 6, pp. 27853-27863.
- Salamci, M.U., Gökbilen, B., 2007, "SDRE Missile Autopilot Design Using Sliding Mode Control with Moving Sliding Surfaces", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 40, No. 7, pp. 768-773.
- Stansbery, D.T., Cloutier, J.R., "Position and Attitude Control of a Spacecraft Using the State-Dependent Riccati Equation Technique", *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois, 1867-1871, June 2000.
- Vaddi, S., Menon, P.K., Ohlmeyer, E. J., 2009, " Numerical State-Dependent Riccati Equation Approach for Missile Integrated Guidance Control", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 32, No. 2, pp. 699-703.
- Voos, H., "Nonlinear state-dependent Riccati equation control of a quadrotor UAV", 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich, Germany, 2547-2552, October 2006.
- Xin, M., Balakrishnan, S., "State Dependent Riccati Equation Based Spacecraft Attitude Control", *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, Nevada, USA, 1-7, 14-17 Ocak 2002.



BATMIŞ HİDROLİK SIÇRAMADA GERİ DÖNÜŞ BÖLGESİ UZUNLUĞUNUN YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİYLE TAHMİNİ

¹Veysel GÜMÜŞ , ²İbrahim Mahmut YOLUK , ³Oğuz ŞİMŞEK ,
⁴Nazire Göksu SOYDAN OKSAL 

^{1, 2, 3}Harran Üniversitesi, Mühendislik, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, TÜRKİYE
⁴Mersin Üniversitesi, Mühendislik, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE
¹gumus@harran.edu.tr, ²mahmut_y@hotmail.com, ³oguzsimsek@harran.edu.tr,
⁴goksusoydan@mersin.edu.tr

(Geliş/Received: 13.02.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.05.2021)

ÖZ: Bu çalışmada, içerisinde kayar kapak bulunan bir laboratuvar kanalının mansabında meydana gelmiş batmış hidrolik sıçramanın geri dönüş bölgesinin uzunluğu deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak kapak açıklığı, mansap su yüksekliği, froude sayıları kullanılarak farklı yapay zekâ yöntemleri ve Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) yöntemi ile batmış hidrolik sıçramada geri dönüş bölgesinin uzunluğu tahmin edilmiştir. Yapay zekâ yöntemleri olarak Yapay Sinir Ağları (YSA), Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ve Genexpresyon Programlama (GEP) yöntemleri tercih edilmiştir. Yöntemlerin geri dönüş bölgesinin uzunluğunu tahmin etmedeki başarı performanslarını belirlemek için belirlilik katsayısı (R^2), Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, kapak açıklığı, mansap su yüksekliği ve froude sayısını girdi parametresi olarak kullanan YSA ve ANFIS yöntemlerinin sıçrama geri dönüş bölgesinin uzunluğunu belirlemede oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batmış hidrolik sıçrama, Geri dönüş bölgesi uzunluğu, Açık kanal akımı, Yapay zekâ yöntemleri

Estimation of the Roller Length of Submerged Hydraulic Jumps using Artificial Intelligence Methods

ABSTRACT: In this study, the roller length of the submerged hydraulic jump that occurred in a downstream of the laboratory canal with a sluice gate is experimentally determined. Experimentally, the roller length of the submerged hydraulic jump is estimated by using artificial intelligence methods and Multiple Linear Regression (MLR) method using the gate opening height, tail water height and froude numbers. Artificial Neural Networks (ANN), Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS) and Genexpression Programming (GEP) methods have been preferred as artificial intelligence methods. The coefficient of determination (R^2), Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) parameters are used to determine the success performance of methods in estimating the length of the roller zone. As a result of the study, it is determined that ANN and ANFIS methods, which use gate opening height, tail water height and froude number as input parameters, are quite successful in determining the roller length of the submerged hydraulic jump.

Key Words: Submerged hydraulic jump, Roller length, Open channel flow, Artificial intelligence methods

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akım ıslak kesitinin tümüyle katı sınırla çevrelenmediği ve atmosfer basıncına maruz kalan akımlar, açık kanal akımı olarak tanımlanır. Serbest yüzeyli akım olarak da adlandırılan bu akımlar; sulama kanaletleri, menfezler, kanalizasyon sistemleri ve yapay açık kanallar gibi doğal olmayan akımlar ile akarsu ve deniz akımları gibi doğal akımları kapsamaktadır. Açık kanal akımlarının zamana bağlı değişim göstermesi değişken, zamandan bağımsız olması ise düzenli akım olarak sınıflandırılır. Bunun yanında, akımın hızının yerden bağımsız olması üniform, yere bağlı olarak değişim göstermesi ise üniform olmayan akım olarak sınıflandırılır.

Açık kanal akım debisinin ve su derinliğinin kontrolünde kayar kapaklar sıklıkla kullanılmaktadır. Kayar kapağın akım alanına yerleştirilmesiyle akım alanında rejim değişikliği (kritik altıdan kritik üstüne geçiş) meydana gelmektedir. Yumuşak eğimli kanalda, kritik-üstü rejim ile kapak altından çıkan su akımı, kısa mesafeli bir daralma sonrasında M3 yavaş değişen akım profili göstererek serbest hidrolik sıçramayı takiben kritik-altı, üniform bir akıma dönüşür. Ancak, sıçrama sonrasındaki su derinliğinin, M3 profilindeki derinlik aralığının eşlenik değerlerinden daha büyük olması durumunda ise serbest hidrolik sıçrama meydana gelemez, kapağın önünde batmış hidrolik sıçrama oluşmaktadır. Bu durumda, serbest sıçramanın memba derinliği, kapak açıklığını aşacak ve hidrolik sıçrama kapak ile etkileşim haline gelerek farklı batmışlık durumlarında su yüzü profili değişecektir. Serbest hidrolik sıçramanın, bir uzunluktaki akımı etkileyen yüzeysel çevrilerden meydana gelen türbülanslı yapısı ve enerji kayıpları batmış hidrolik sıçramada da olmaktadır (Gümüş ve diğ., 2013).

Hidrolik sıçrama, akımda önemli miktarda enerji kaybına neden olduğundan en bilinen haliyle barajlarda, dolu savaklardan bırakılan yüksek enerjiye sahip suyun güvenli bir şekilde mansaba iletilmesinde ve enerji kırıcı yapıların projelendirilmesinde etkin rol oynamaktadır. Ayrıca, hidrolik sıçrama ile yüksek enerjiye sahip akımın yapıya ve çevreye vereceği zararlar minimuma indirilir, akımın sahip olduğu enerji kontrol edilir, yatak erozyonu önlenir ve suyun arıtılması sürecinde kullanılan kimyasal maddelerin entegre edilmesi süreci rahatlatılır. Meydana gelen hidrolik sıçramanın uzunluğunun bilinmesi özellikle hidrolik yapıların tasarımı açısından önemli bir etmendir.

Literatürde serbest ve batmış hidrolik sıçramanın tahmin edilmesi ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır (Houichi ve diğ., 2013; Mahtabi ve Satari, 2016; Roushangar ve Homayounfar, 2019). Husain ve diğ. (1994), serbest hidrolik sıçrama profilini eğimli dikdörtgen bir açık kanalda deneysel olarak ölçmüşlerdir. Üç farklı kanal eğimi (% 2.5, 5 ve 7) ve farklı Froude sayılarında toplamda 440 adet deney yapmışlardır. Regresyon analizi yardımıyla deneysel olarak ölçülmüş sıçrama uzunlukları ile kuyruk suyu yüksekliklerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak sıçrama uzunluğu ve derinliği ile ilgili yeni denklemler önermişlerdir. Negm ve Shouman, (2002), çalışmalarında, yapay olarak pürüzlendirilmiş dikdörtgen dinlendirme havuzunda hidrolik sıçrama karakteristiklerini deneysel olarak ölçmüşlerdir. Deneysel ölçüm değerlerini kullanarak batmış hidrolik sıçramanın karakteristiklerini yapay sınır ağları (YSA) kullanarak modellemeye çalışmışlardır. Veri seti, eğitim ve test verisi olmak üzere ikiye ayrılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, YSA modelinin batmış hidrolik sıçramanın karakteristiklerinin tahmin edilmesinde güçlü ve etkili bir yöntem olduğu bildirilmiştir. Negm, (2009), çalışmasında, dinlendirme havuzunda meydana gelen serbest ve batmış hidrolik sıçrama uzunluklarını tahmin etmek için bir YSA modeli geliştirmiştir. YSA modelinde kullanılan veriler laboratuvar kanalında gerçekleştirilen deneylerden toplanmıştır. Deneylerle elde edilen bu sonuçlar, Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) ve YSA modelleri ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeler neticesinde, serbest ve batmış hidrolik sıçramanın karakteristiklerini belirlemede YSA modelinin ÇDR modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Naseri ve Othman, (2012), yatay dikdörtgen bir kesite sahip açık kanal akımında hidrolik sıçramanın uzunluğunu belirlemek için bir YSA modeli geliştirmişlerdir. Sıçrama karakteristiklerini belirlemek için kurmuş oldukları YSA modelinde iki farklı algoritma kullanmışlardır. Ele alınan YSA modeliyle elde edilen sonuçlarla, bir ampirik denklem olan Silvester denklemi kullanılarak, elde edilen sonuçları karşılaştırmışlar ve YSA modelinin sıçrama karakteristiklerini belirlemede ampirik denkleme kıyasla daha uygun sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Abbaspour ve diğ. (2013), hidrolik sıçrama özelliklerini

belirleyebilmek için YSA ve Genetik Programlama (GP) yöntemlerini kullanmışlardır. Deneysel olarak elde edilen sıçrama özelliklerinin, YSA ve GP yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, YSA yönteminin GP yöntemine nazaran daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Banhatti ve Hinge (2014), çalışmalarında, dikdörtgen bir dinlendirme havuzunda belirli bir büyüklüğe sahip savak kullanarak hidrolik sıçramanın konumunu deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneylerle elde edilen verilerin modellenmesi için YSA yöntemini tercih etmişlerdir. YSA ile çeşitli parametrelerin ara değerlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda YSA yönteminin kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Karbasi ve Azamathulla (2016), çalışmalarında, engebeli bir yatakta hidrolik sıçrama özelliklerini tahmin etmek için Genexpresyon Programlama (GEP) yöntemini kullanmışlar ve elde edilen sonuçları YSA yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Bunu yaparken literatürde daha önce yayınlanmış olan verileri kullanmışlardır. Sonuç olarak YSA yönteminin GEP yöntemine göre daha doğru sonuçlar verdiğini ancak pratik amaçlar için açık denklemler türetilmesi noktasında GEP yönteminin daha kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır. Azimi ve diğ. (2018), çalışmalarında, pürüzlü bir yatak üzerindeki meydana gelen hidrolik sıçramanın geri dönüş uzunluğunu hibrit ateşböceği algoritması ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi (ANFIS-FA) kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Bunu yaparken dikkate aldıkları parametreler Froude sayısı, ardışık derinlikler ve pürüzlülük olmuştur. Çalışma sonucunda, ANFIS-FA yönteminin sıçrama geri dönüş bölgesi uzunluğunu belirlemede oldukça başarılı olduğu sonucuna varmışlardır. Kumar ve diğ. (2019), YSA modelini kullanarak pürüzlülüğün ve eğimin hidrolik sıçrama üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Burada pürüzlülük farklı özelliklere sahip agregalar ile gerçekleştirilmiş ve bu agregalar ile üç farklı pürüzlülük elde edilmiştir. Ayrıca bu işlemler esnasında iki farklı yatak eğimi kullanmışlardır. Sonuç olarak, hidrolik sıçramanın ardışık derinliklerinin tahmininde YSA modelinin oldukça kullanışlı olduğu kanısına varmışlardır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, sıçramanın farklı özelliklerini tahmin etmek için ampirik ya da yapay zekâ yöntemleri ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, sıçramanın geri dönüş bölgesinin uzunluğunun tahmin edilmesi ile ilgili çalışmaların ise sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu çalışma, batmış hidrolik sıçramanın geri dönüş bölgesinin uzunluğunun tahmin edilmesi ile ilgili detaylı bir yaklaşım sunmaktadır.

Meydana gelen sıçramanın uzunluğu inşa edilecek su yapılarının tasarımı için önemli bir parametre olup, bu çalışma kapsamında batmış hidrolik sıçramaya ait akım karakteristikleri deneysel olarak ölçülmüş ve deneysel veriler kullanılarak farklı yapay zekâ yöntemleri kullanılarak sıçrama geri dönüş bölgesinin uzunluğu kısıtlı girdi parametreleri ile tahmin edilmiştir. Farklı başarı ölçütleriyle yöntemlerin başarısı belirlenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneyleler (Experiments)

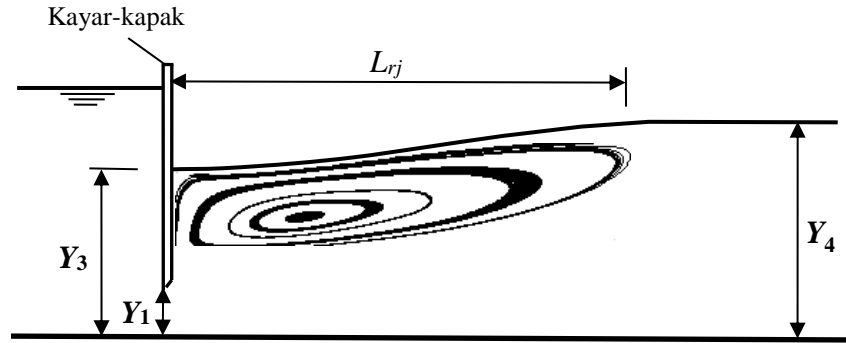
Deneyleler, Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan açık kanal modelinde gerçekleştirilmiştir. Deneyleler için laboratuvarında bulunan 400x35x35 cm boyutlarında tabanı ve yan duvarları camdan imal edilmiş dikdörtgen kesitli açık kanal modeli kullanılmıştır. Kanaldaki suyun sirkülasyonu bir santrifüj pompa ile sağlanmış ve debi ölçümü Altigen marka elektromanyetik debi metre ile gerçekleştirilmiştir. Farklı akım durumlarında su seviyesinin stabil olduğu bölgelerde su derinliği ölçümleri ise cihaz üzerine önceden yerleştirilen dijital limnometre yardımıyla elde edilmiştir.

Şekil 1'de, açık kanal akımında meydana gelen batmış hidrolik sıçramanın deney düzeneği ve şematik görüntüsü verilmiştir. Deney modeli oluşturulurken, kanal başlangıç noktasından 115 cm uzaklığa ve kanal sonuna birer kayar kapak yerleştirilmiştir. 0,01 m ile 0,029 m arasında değişen 9 farklı kapak altı su yüksekliği (y_1), 0,09 m ile 0,125 m arasında değişen 3 farklı kanal sonu kapak su yüksekliği, her kurulan deney düzeneği ile eş zamanlı değiştirilen 11.17 m³/saat ile 37.20 m³/saat aralığında değişim gösteren farklı debi değerleri ve 1,06 ile 4,07 arasında değişen değerler alan Froude sayıları ile toplam 98 adet deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde batmış hidrolik sıçramanın geri dönüş bölgesinin

uzunlukları (Roller length- L_{rj}) boya deneyi yardımıyla belirlenmiş ve mansap bölgesindeki su derinliğinin stabil olduğu durumdaki su yükseklikleri de (y_4) 0.01 mm hassasiyetine sahip limnometre yardımıyla ölçülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 1. (a) Deney düzeneği, (b) Deney düzeneğinin şematik görüntüsü

Figure 1. (a) Experimental setup, (b) Schematic view of experimental setup

Yöntem (Method)

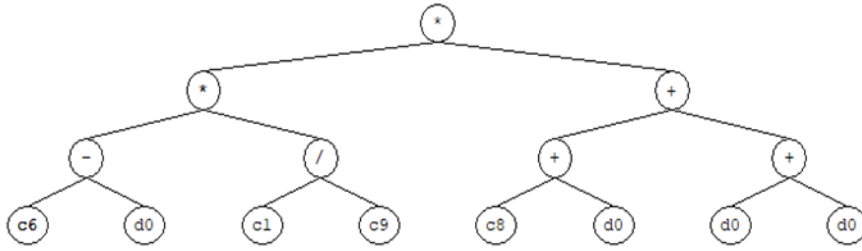
Genexpresyon Programlama (Genexpression Programming -GEP)

Genexpresyon programlama (GEP) mevcut literatür içerisinde geleneksel genetik programlama (GP) tekniklerinin en gelişmiş şekli olarak kabul edilmektedir. GP, yüksek derecede otomatikleştirilmiş bir şekilde doğrusal olmayan tahmin modelleri oluşturabilen bir makine öğrenimi yöntemidir (Majidifard ve diğ., 2021). Geleneksel genetik algoritmada, girdiler doğrusal ve sabit uzunluktadır. Ancak genetik programlamada girdiler farklı uzunluk ve şekillerde olup doğrusal değildir. GEP yönteminde ise girdiler başlangıçta sabit uzunlukta değerlendirilir, daha sonra boyut ve şekilleri doğrusal olmayacak şekilde tanımlanır (Ferreira, 2001). GEP yönteminin uygulamadaki avantajı açık bir yapıya sahip olmasıdır. Bunun yanında GEP modelinin diğer veri odaklı yöntemlere (YSA, ANFIS) göre en güçlü yanı ise fiziksel

ilişkiler arasında açık formüller üretebilmesidir (Kişi ve diğ., 2012). GEP yönteminde ilk olarak tahmin için, en iyileme yapılacak uygunluk fonksiyonunun seçilmesi gerekmektedir. Uygunluk fonksiyonu için bağıl hata, mutlak hata veya belirlilik katsayısı seçilebilir.

Bu çalışma kapsamında GEP yönteminde tahmin modeli tasarlanırken uygunluk fonksiyonu olarak karekök ortalama karesel hata (KOKH) parametresi seçilmiştir. Oluşturulmuş olan 12 model içerisinde dokuz modelde üç alt fonksiyon, üç modelde ise bir alt fonksiyon kullanılmıştır. Yöntem ile elde edilen her bir alt fonksiyonun toplanması ile sıçrama uzunluğunu tahmini için kullanılacak fonksiyon elde edilmiştir. Şekil 2'de GEP yönteminde elde edilen örnek bir alt fonksiyon verilmiştir.

Sub-ET 1

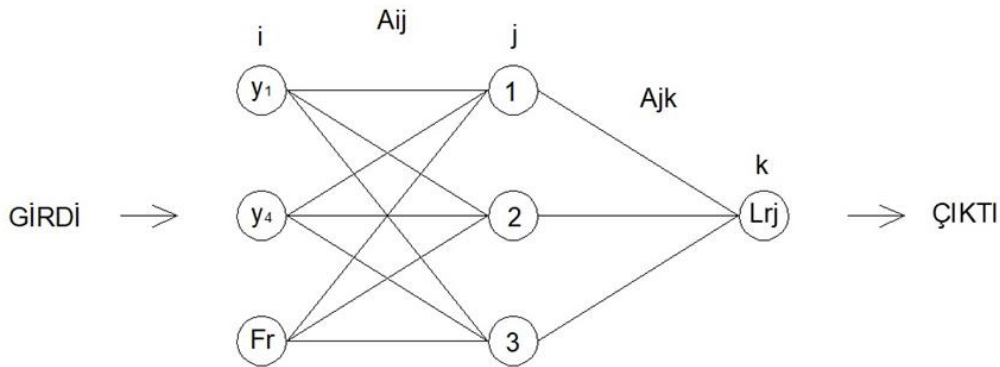


Şekil 2. Çalışmada GEP yönteminde elde edilen örnek bir alt fonksiyon

Figure 2. An example sub-function obtained in the GEP method from this study

Yapay Sinir Ağları -YSA (Artificial Neural Networks -ANN)

Yapay sinir ağları, farklı bilim dallarında yaygın olarak kullanılan kavramsal bir tekniktir. YSA modelleri, analitik ilişkileri içermeyen problemleri modellemedeki kolaylıkları nedeniyle araştırmacılar tarafından son yıllarda tercih edilmektedir (Naseri ve Othman, 2012). YSA modelleri, parametreler arasındaki içsel doğrusal olmayan ilişkiyi karmaşık bir problemle eşleştirmeye çalışır. Şekil 3'te giriş katmanında (i) üç nöron, gizli katmanda (j) üç nöron ve çıkış katmanında (k) bir nöron olan tipik bir YSA modeli gösterilmiştir. Şekil 1'de verilmiş olan A_{ij} ve A_{jk} terimleri ise hücre katmanları arasındaki bağlantı ağırlıklarıdır ve bu değerler model kurulma esnasında rastgele değerler alırlar. Ancak, eğitime sürecinde hesaplanan çıktı değerlerinin gözlenen değerlerle karşılaştırılması sonucunda sürekli olarak değiştirilirler. Son olarak da hataları minimuma düşürecek bağlantı ağırlık değerlerine yakınsayana kadar hatalar geriye doğru yayılır. Bu çalışmada ağırlıkların ayarlanması için Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır (Marquardt, 1963).



Şekil 3. Üç katmanlı yapay sinir ağı modeli

Figure 3. Three layers artificial neural network model

Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS)

Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System-ANFIS), yapay sinir ağları ile bulanık mantık sistemlerini birleştirme prensibi ile Jang (1993) tarafından geliştirilmiştir. Temelde ANFIS, Sugeno tipi bulanık sistemlerin yapay sinir ağları ile öğrenme yapmasıyla meydana gelen bir ağ modelidir. Girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişkiyi elde etmek ve üyelik fonksiyonunu (Membership function) belirlemek için eğitim sürecinde yapay sinir ağları kullanılır (Wu ve diğ., 2009). Bu çalışmada, farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak sıçrama uzunlukları tahmin edilmeye çalışılmıştır. ANFIS hakkında daha fazla bilgi Jang (1993)'de bulunabilir.

Çoklu Doğrusal Regresyon -ÇDR (Multiple Linear Regression-MLR)

Veri setinde bulunan bağımsız değişkenler yardımıyla bağımlı değişkeni tahmin etmek ve hangi bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni etkilediğini bulmak için çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) klasik bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

ÇDR'de bağımlı değişken y , bağımsız değişkenler x_1, x_2, \dots, x_p olarak ifade edilirse,

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j + \dots + b_px_p + e \quad (1)$$

olarak yazılabilir. Burada $b_0, b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_p$ regresyon katsayılarını ifade etmektedir. Herhangi bir b_j katsayısı, diğer değişkenlerin etkisi ortadan kaldırıldığında, yani diğer değişkenler sabit tutulduğunda, x_j değişkeninde ortaya çıkan bir birimlik değişime karşılık y değişkenindeki beklenen değişiklik miktarını verir. Bu nedenle, b_j ($j=1, 2, \dots, p$) parametreleri kısmi regresyon katsayıları olarak adlandırılmaktadır. Denklem (1) içerisinde ifade edilen b_0 kesim noktası e ise hata terimini temsil etmektedir (Yeşiltaş, 2018).

BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Laboratuvarda farklı akım özelliklerine sahip toplam 98 batmış hidrolik sıçramaya ait y_1, y_4, Fr ve L_{rj} değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında kullanılan yöntem ve modellerin başarısını belirlemek için niceliksel karşılaştırma kriteri olarak belirlilik katsayısı (R^2), ortalama karesel hata (OKH) ve ortalama mutlak hata (OMH) parametreleri kullanılmış ve Denklem 2, 3 ve 4'te sırasıyla verilmiştir.

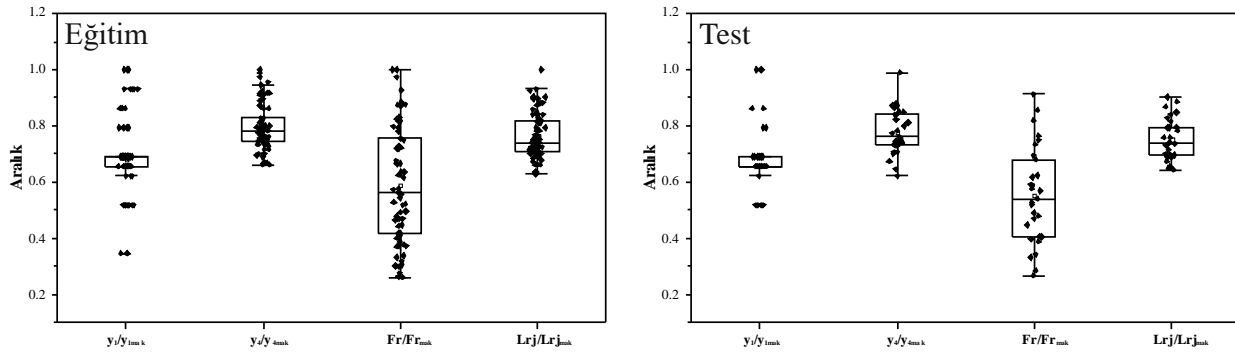
$$R^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{ortalama})^2 - \sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{tahmin})^2}{\sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{ortalama})^2} \quad (2)$$

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{tahmin})^2 \quad (3)$$

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Lrj_{hesap} - Lrj_{tahmin}| \quad (4)$$

Bu denklemlerde bulunan N , toplam veri sayısını, Lrj_{hesap} hesaplanan sıçrama uzunluğu değerini, $Lrj_{ortalama}$ hesaplanan sıçrama uzunluğu değerlerinin ortalaması, Lrj_{tahmin} ise model sonucunda elde edilen sıçrama uzunluğu değerini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında analizler, YSA, ÇDR ve ANFIS için

Matlab programında hazırlanan kodlar ile yapılmış, GEP yönteminin uygulaması ise Genexprotools yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerin tahmin edilmesi için kurulan modellerde öncelikli olarak veri setinde bulunan 98 deney seti rastgele bir seriye dönüştürülmüş, sonrasında ise bu verilerin yaklaşık %70'ine karşılık gelen 69 veri seti, modellerin eğitim sürecinde, geri kalan %30 yani 29 veri ise kurulan modelin başarısını görmek açısından test sürecinde kullanılmıştır. Böylece, eğitim sürecine hiç dahil edilmemiş veri setleri ile model performansının değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Eğitim ve Test sürecinde kullanılan verilerin en büyük değere bölünerek boyutsuz hale getirilmiş dağılımları Şekil 4'te verilmiştir. Burada, rastgele seçilen eğitim ve test verilerinin birbirlerine yakın aralıkta olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Eğitim ve test sürecinde kullanılan verilerin dağılımı

Figure 4. Distribution of the training and testing data

GEP Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the GEP Method)

GEP yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için üç farklı girdi parametresine sahip ancak farklı operatörler kullanılarak toplam 12 model oluşturulmuştur. Çizelge 1'de verilmiş olan modellerde y_1 kapak açıklığı, y_4 sıçrama sonrası meydana gelen su yüksekliğini ve Fr ise kapak altı bölgesinde hesaplanan Froude sayısını ifade etmektedir. Buna göre, Model 1, 4, 7 ve 10'da sadece y_4 (ifade ağacındaki karşılığı d_0), Model 2, 5, 8 ve 11'de y_1 (ifade ağacındaki karşılığı d_0) ve y_4 (ifade ağacındaki karşılığı d_1), Model 3, 6, 9 ve 12'de ise y_1 (ifade ağacındaki karşılığı d_0), y_4 ve Fr (ifade ağacındaki karşılığı d_2) parametreleri girdi olarak verilmiş, çıktı olarak da geri dönüş bölgesi uzunluğu (L_{rj}) tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 1. GEP yöntemi ile elde edilen sonuçlar*Table 1. Results obtained with the GEP method*

MODEL	Eğitim			Test			Kullanılan Fonksiyonlar
	R ²	OKH (cm ²)	OMGH (%)	R ²	OKH(cm ²)	OMGH (%)	
Model 1 (GEP DM01) (y ₄)	0,7982	10,10	3,60	0,7669	9,78	3,86	+, -, *, /, exp(x), x ² , x ^{1/3}
Model 2 (GEP DM02) (y ₁ , y ₄)	0,8068	9,72	3,50	0,7378	11,13	4,07	
Model 3 (GEP DM03) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8146	9,34	3,62	0,7571	10,42	3,88	
Model 4 (GEP DM04) (y ₄)	0,8063	9,70	3,56	0,7608	9,85	3,93	+, -, *, /, exp(x), ln(x), 1/x x ² , x ³ , x ⁴ , x ⁵ , x ^{1/3} , sin(x) arctan(x), tanh(x)
Model 5 (GEP DM05) (y ₁ , y ₄)	0,7954	10,28	3,57	0,7370	10,72	3,97	
Model 6 (GEP DM06) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8287	8,80	3,48	0,7067	11,86	3,94	
Model 7 (GEP DM07) (y ₄)	0,7949	10,27	3,68	0,7315	1,11	4,12	(x+y), (x-y), (x*y), (x/y) pow(x,y), sqrt(x), exp(x) pow(10,x), ln(x), abs(x), 1/x, x ² , x ³ , x ⁴ , x ⁵ , x ^{1/3} , x ^{1/4} , x ^{1/5} , Pi(x), E(x), sin(x), cos(x), tan(x), arcsin(x), arccos(x), arctan(x), sinh(x), cosh(x), tanh(x)
Model 8 (GEP DM08) (y ₁ , y ₄)	0,8030	9,86	3,52	0,7428	10,62	3,96	
Model 9 (GEP DM09) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8375	8,13	3,33	0,7210	11,64	3,91	
Model 10 (GEP DM10) (y ₄)	0,7949	10,91	3,91	0,7344	12,68	4,55	+, -, *, /
Model 11 (GEP DM11) (y ₁ , y ₄)	0,7942	10,35	3,63	0,7368	10,79	4,11	
Model 12 (GEP DM12) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8007	10,24	3,77	0,7447	11,49	4,23	

Çizelge 1’de verilen R², OKH ve OMGH parametrelerine göre, test verileri dikkate alındığında, Model 1 ve 4’ün birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği ve yaklaşık olarak %3,9’luk bir hata oranı ile sıçrama uzunluğunu tahmin ettikleri görülmüştür. Kullanılan operatör sayısının artırıldığı Model 4, 5 ve 6’da ise, operatör sayısının artırılmasıyla model başarısının artmadığı belirlenmiştir. En çok işlem operatörü sayısının kullanıldığı Model 7, 8 ve 9’da ise performans kriterleri açısından anlamlı bir değişim görülmemiş, %4 civarında hata oranı ve 0,70-0,75 arasında bir belirlilik katsayısı değeri belirlenmiştir. Sadece toplama, çıkarma, çarpma ve bölme işlemlerinin kullanıldığı ve en basit formülü bulmayı amaçlayan Model 10, 11 ve 12’de ise hata oranının %4,11 ile girdi parametresi olarak sadece y₁ ve y₄’ü kullanan Model 11’de belirlenmiştir. GEP yönteminin sıçrama uzunluğunu belirlemedeki genel yaklaşımı incelendiğinde, alt fonksiyon sayısı ya da işlem operatör sayısının artmasının deneysel verilere yaklaşımda model performansını çok fazla etkilemediği görülmüştür. y₁, y₄ ve Fr sayısının girdi olarak

$$Lr_{j_{Model1}} = \sqrt[3]{y_4} + \left(\left(\sqrt[3]{(c_1 + y_4)y_4} \right) (c_1 y_4 + 2y_4) \right) + y_4 \quad (5)$$

YSA Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the ANN Method)

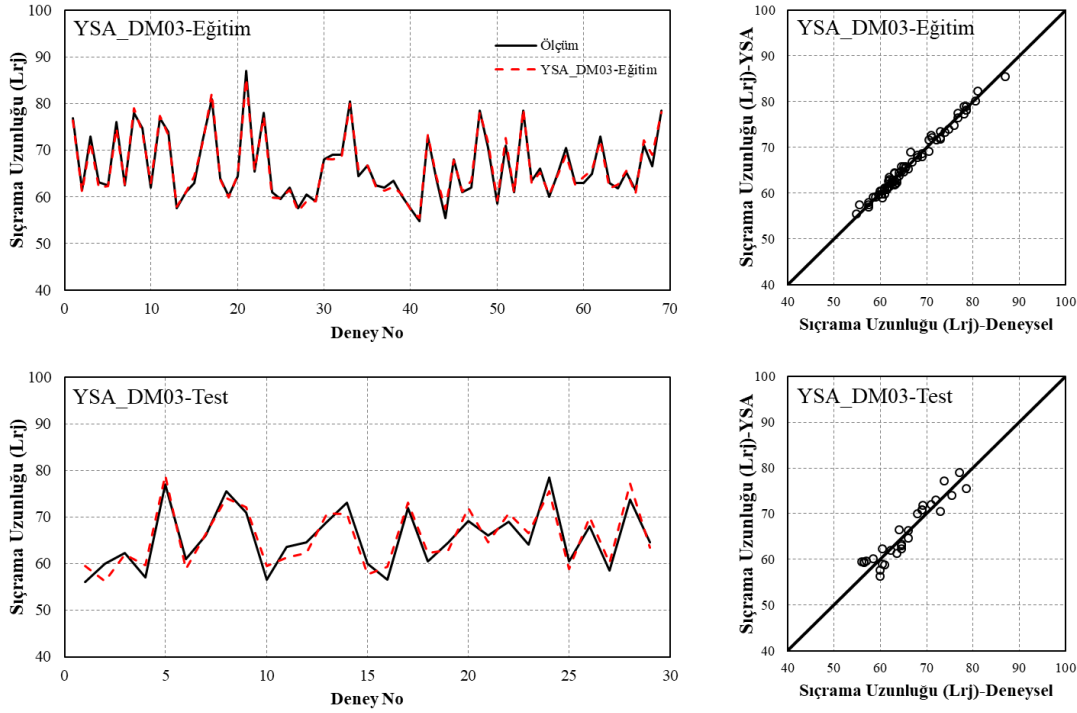
YSA yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için üç farklı girdi parametresine sahip üç model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir. Kullanılan üç model olan YSA DM01, YSA DM02 ve YSA DM03’te ara katman sayısı sırasıyla 4, 4 ve 7 olarak belirlenmiştir. Ara katman sayısının belirlenmesi için MATLAB yazılımı yardımıyla bir optimizasyon yapılmış ve test verileri içerisinde en düşük OKH değerini veren ara katman sayısı modelde kullanılmıştır. Buna göre, eğitim sürecinde R² değerleri 0,8299 ile 0,9847 aralığında, test sürecinde ise 0,7911 ile 0,8872 aralığında değiştiği, OMGH değerlerinin de test sürecinde %4’ün altında olduğu görülmektedir. Farklı girdi parametreleri kullanılarak elde edilen model sonuçlarından y₁, y₄ ve Fr kullanıldığı YSA DM03’ün tüm başarı ölçütlerinde hem eğitim hem de test sürecinde en başarılı model olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2. YSA yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Table 2. Results obtained with the YSA method

	Eğitim			Test		
	R ²	OKH	OMGH (%)	R ²	OKH	OMGH (%)
Model 1 (YSA DM01) (y ₄)	0,8299	20,26	7,65	0,7911	8,44	3,76
Model 2 (YSA DM02) (y ₁ , y ₄)	0,8956	12,44	6,46	0,7997	8,22	3,51
Model 3 (YSA DM03) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,9847	1,82	2,55	0,8872	4,84	3,16

YSA DM03 modeli kullanılarak YSA yöntemi ile elde edilen eğitim ve test sonuçlarının deneysel verileri ile uyumunun görülebilmesi için dağılım ve saçılım grafikleri Şekil 7’de verilmiştir. Buna göre, eğitim sürecinde verilerin birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları, tahmin değerlerinin gerçek değerlerle neredeyse aynı değeri buldukları görülmektedir. Test sonuçları incelendiğinde ise, eğitim verilerine benzer bir şekilde oldukça başarılı olduğu görülmüştür.



Şekil 7. YSA ile en başarılı modelin eğitim ve test sonuçlarının dağılımı (YSA DM03)

Figure 7. Distribution of training and test results of the most successful model with ANN

ANFİS Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the ANFIS Method)

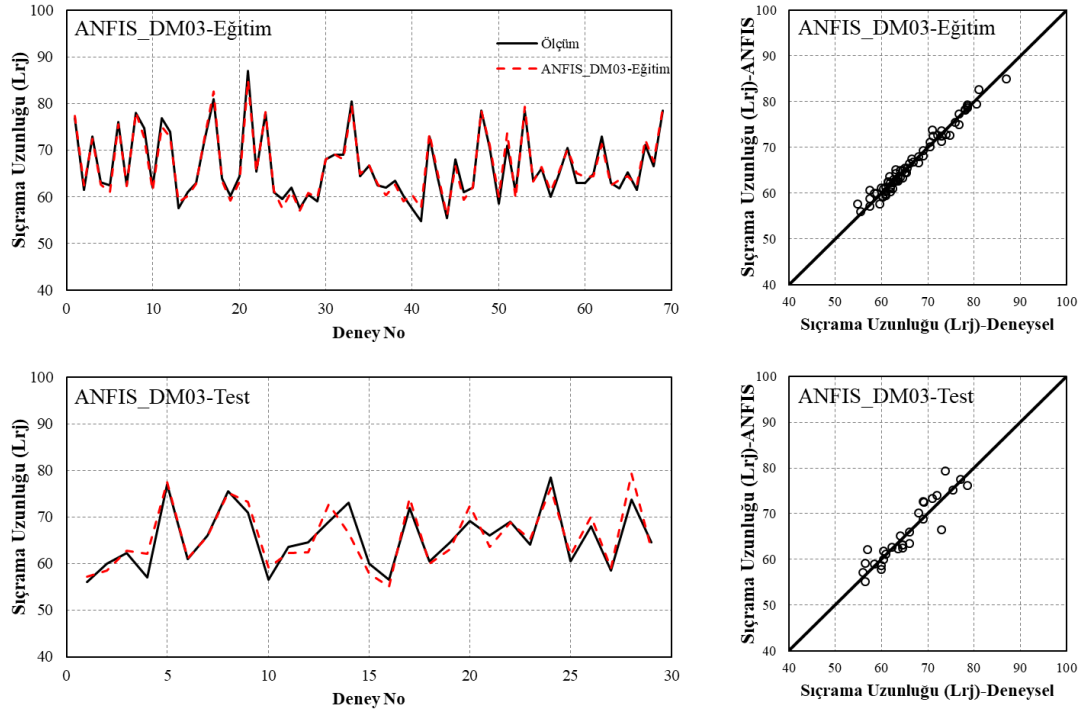
ANFİS yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için YSA yöntemine benzer bir şekilde yine üç farklı girdi parametresine sahip üç model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. ANFİS yönteminde üye fonksiyonu sayısının belirlenmesi için YSA yöntemine benzer bir şekilde test verileri içerisinde en düşük OKH değerini veren üyelik fonksiyon sayısı modelde kullanılmıştır. Kullanılan üyelik fonksiyonu sayıları ANFİS DM01, ANFİS DM02 ve ANFİS DM03 için sırasıyla 4, 2 ve 2 olarak belirlenmiştir. ANFİS ile elde edilen eğitim ve test sonuçları değerlendirildiğinde, ele alınan tüm yöntemler içerisinde en büyük R^2 değeri ve en düşük OMGH ve OKH değerinin ANFİS DM03 modelinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 3. ANFİS yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Table 3. Results obtained with the ANFIS method

	Eğitim			Test		
	R^2	OKH	OMGH (%)	R^2	OKH	OMGH (%)
Model 1 (ANFİS DM01) (y_4)	0,8428	7,87	3,14	0,7816	9,14	3,70
Model 2 (ANFİS DM02) (y_1, y_4)	0,8899	5,51	2,74	0,8202	7,67	3,43
Model 3 (ANFİS DM03) (y_1, y_4, Fr)	0,9729	1,36	1,43	0,8638	6,18	2,89

ANFIS DM03 modeli kullanılarak elde edilen eğitim ve test sonuçlarının deneysel verileri ile uyumunun görülebilmesi için dağılım grafikleri Şekil 8’de verilmiştir. Buna göre, eğitim sürecinde verilerin birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları, tahmin değerlerinin gerçek değerlerle neredeyse aynı değeri buldukları görülmektedir. Test sonuçları incelendiğinde ise, eğitim verilerine benzer bir şekilde oldukça başarılı olduğu görülmüştür.



Şekil 8. ANFIS ile en başarılı modelin eğitim ve test sonuçlarının dağılımı

Figure 8. Distribution of training and test results of the most successful model with ANFIS

ÇDR Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the MLR Method)

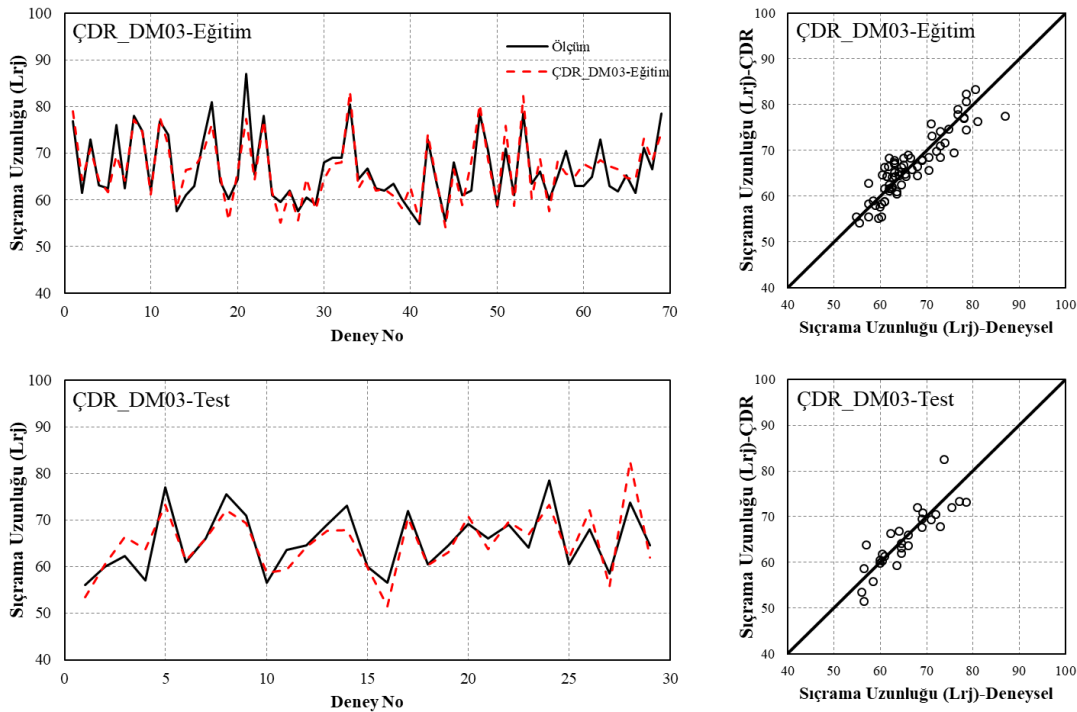
ÇDR yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için yine üç farklı girdi parametresine sahip üç model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4’te verilmiştir. Klasik bir yöntem olan ÇDR yönteminin sonuçlarının birbirine yakın olduğu ve R^2 değerinin eğitim sürecinde 0,79-0,81 aralığında, test sürecinde ise 0,73-0,75 aralığında olduğu görülmüştür. OMGH değerleri de %4-%5 aralığında olmuştur. ÇDR yönteminde üç girdi parametresinin kullanıldığı ÇDR DM03 modelinin tüm başarı ölçütlerinde YSA ve ANFIS’te olduğu gibi en başarılı model olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4. ÇDR yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Table 4. Results obtained with the MLR method

	Eğitim			Test			Formül
	R ²	OKH	OMGH (%)	R ²	OKH	OMGH (%)	
Model 1 (ÇDR DM01) (y ₄)	0,7949	25,49	9,16	0,7344	12,31	4,42	$Lrj = 4,6466y_4$
Model 2 (ÇDR DM01) (y ₁ , y ₄)	0,7938	25,46	9,21	0,7331	12,25	4,41	$Lrj = 0,2428y_1 + 4,6134y_4$
Model 3 (ÇDR DM01) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8159	22,47	8,85	0,7487	11,44	4,01	$Lrj = 1,8205y_1 + 4,0919y_4 + 0,0181Fr$

Deneyel sonuçlar ile en uyumlu model (ÇDR DM03) ile elde edilen eğitim ve test sonuçlarının dağılım grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre, eğitim ve test sürecinde verilerin birbirleri ile uyumlu oldukları, sadece yüksek sıçrama uzunluklarını belirlemede nispeten başarısız olduğu söylenebilir.



Şekil 9. ÇDR ile en başarılı modelin eğitim ve test sonuçlarının dağılımı

Figure 9. Distribution of training and test results of the most successful model with MLR

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında farklı akım özelliklerine sahip kayar kapak sonrası meydana gelen batmış hidrolik sıçramaya ait geri dönüş bölgesinin uzunlukları deneysel olarak belirlenmiştir. Toplam 98 adet deney için farklı girdi parametreleri kullanılarak son yıllarda değişik alanlarda da kullanılan yapay zekâ yöntemlerinden Genexpresyon Programlama (GEP), Yapay Sinir Ağları (YSA), Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System-ANFIS) ve klasik bir yöntem olan Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) sıçrama uzunluğu tahmin edilmiştir. Yapay

zekâ yöntemleri ve ÇDR ile kurulan modellerde veri setinin %70'i eğitim sürecinde, %30'u ise test sürecinde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

GEP yöntemi ile oluşturulan 12 modelde test sonuçlarına göre en başarılı tahmini girdi parametresi olarak sadece y_4 'ü ve toplam 7 tane matematiksel operatörü kullanan Model 1 olmuştur. Ayrıca, GEP yönteminde matematiksel operatörlerin arttırılmasının model başarısını gözle görülür düzeyde arttırmadığı belirlenmiştir.

YSA, ANFIS ve ÇDR yöntemlerinde ise ele alınan tüm performans kriterlerine göre en başarılı model y_1 , y_4 ve Fr parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı Model 3 olmuştur. Bu üç yöntem içerisinde ise özellikle YSA ve ANFIS yönteminin sıçrama geri dönüş bölgesinin uzunluğunu tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar verdiği ve sıçrama geri dönüş bölge uzunluğunun tahmin edilmesi için rahatlıkla kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (HÜBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No:18195).

KAYNAKLAR

- Abbaspour, A., Farsadizadeh, D., Ghorbanı, M. A., 2013, "Estimation of hydraulic jump on corrugated bed using artificial neural networks and genetic programming", *Water Science and Engineering*, Cilt 6, Sayı 2, ss. 189-198.
- Azimi, H., Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Michelson, D. G., 2018, "A combined adaptive neuro-fuzzy inference system–firefly algorithm model for predicting the roller length of a hydraulic jump on a rough channel bed", *Neural Computing and Applications*, Cilt 29, Sayı 6, ss. 249-258.
- Banhatti, A. G., Hinge, G. A., 2014, "Artificial Neural Network Model for Control of Hydraulic Jump" *CiiT, International Journal of Artificial Intelligent Systems and Machine Learning*, Cilt 6, Sayı 3, ss. 81-84.
- Ferreira, C., 2001, "Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems", *Complex Systems*, Cilt 13, Sayı 2, ss. 87–129.
- Gümüş, V., Aköz, M. S., Kırkgöz, M. S., 2013, "Kapak mansabında batmış hidrolik sıçramanın deneysel ve sayısal modellenmesi", *İMO Teknik Dergi*, Cilt 24, Sayı 2, ss. 6379-6397.
- Houichi, L., Dechemi, N., Heddam, S., Achour, B., 2013, "An evaluation of ANN methods for estimating the lengths of hydraulic jumps in U-shaped channel", *Journal of Hydroinformatics*, Cilt 15, Sayı 1, ss. 147-154.
- Husain, D., Alhamid, A. A., Negm, A. A. M., 1994, "Length and depth of hydraulic jump in sloping channels", *Journal of Hydraulic Research*, Cilt 32, Sayı 6, ss. 899-910.
- Jang, J. S., 1993, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Cilt 23, Sayı 3, ss. 665-685.
- Karbasi, M., Azamathulla, H. M., 2016, "GEP to predict characteristics of a hydraulic jump over a rough bed", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Cilt 20, Sayı 7, ss. 3006-3011.
- Kisi, O., Shiri, J., & Nikoofar, B. 2012. "Forecasting daily lake levels using artificial intelligence approaches", *Computers & Geosciences*, 41, 169-180.
- Kumar, M., Kumar, S., Bidhu, S., 2019, "Determination of sequent depth of hydraulic jump over sloping floor with rounded and crushed aggregates using experimental and ANN model", *Water Supply*, Cilt 19, Sayı 8, ss. 2240-2247.
- Mahtabi, G., Satari, M. T., 2016, "Investigation of hydraulic jump characteristics in rough beds using M5 model tree", *Jordan J. Agric. Sci*, Cilt 12, ss. 631-648.
- Majidifard, H., Jahangiri, B., Rath, P., Contreras, L. U., Buttlar, W. G., Alavi, A. H., 2021, Developing a prediction model for rutting depth of asphalt mixtures using gene expression programming", *Construction and Building Materials*, Cilt 267, 120543.

- Marquardt, D. W., 1963, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, Cilt 11, Sayı 2, ss. 431-441.
- Naseri, M., Othman, F., 2012, "Determination of the length of hydraulic jumps using artificial neural networks", *Advances in Engineering Software*, Cilt 48, ss. 27-31.
- Negm, A. M., 2009-January, "Modeling Of Hydraulic Jumps Formed At Drops Using ANNs", *7th ISE & 8th HIC*, Conception, Chile, January, ss. 1-10.
- Negm, A. M., Shouman, M. A., 2002- April, "Artificial Neural Network model for submerged hydraulic jump over roughened floor", *In Proc. 2nd Int. Conf. For Advanced Trends in Engineering (MICATE'2002)*, April, ss. 7-9.
- Roushangar, K., Homayounfar, F., 2019, "Prediction characteristics of free and submerged hydraulic jumps on horizontal and sloping beds using SVM method", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Cilt 23, Sayı 11, ss. 4696-4709.
- Wu, J. D., Hsu, C. C., Wu, G. Z, 2009, "Fault gear identification and classification using discrete wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference", *Expert Systems with Applications*, Cilt 36, Sayı 3, ss. 6244-6255.
- Yeşiltaş, Y., 2018, "Yapay zeka yöntemleri ile GAP bölgesindeki aylık tava buharlaşma değerlerinin tahmin edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.



ARI ALGORİTMASI (AA) VE PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (PSO) KULLANARAK ÇEYREK ARAÇ MODELİ TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

¹Onur ESER , ²Abdullah ÇAKAN , ³Fatih Mehmet BOTSALI , ⁴Mete KALYONCU 

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi-Makine Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹me.onureser@gmail.com, ²acakan@ktun.edu.tr, ³fbotsali@ktun.edu.tr, ⁴mkalyoncu@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 16.02.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.05.2021)

ÖZ: Bu çalışmada, araç dinamiği çalışmalarında yaygın olarak kullanılan çeyrek araç modeli kullanılmıştır. Çeyrek araç modeli oluşturularak, sistemin yaylı ve yaysız kütlesi, yay sertliği, sönümleme katsayısı ve lastik sertliği olmak üzere beş adet tasarım parametresi optimizasyon algoritmaları aracılığı ile belirlenmek üzere seçilmiştir. Optimizasyonun amacı; belirlenen yol profilinde çeyrek araç süspansiyon sisteminin daha iyi sürüş kabiliyeti ve konfor elde edebilmek adına süspansiyon sistemindeki sapmaların minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Arı Algoritması (AA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmaları kullanılarak MATLAB yazılımı aracılığı ile tasarım parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiştir. Çeyrek araç modeli blok diyagramı Matlab/Simulink ile oluşturulmuş ve belirlenen optimum değerler kullanılarak, ISO 8608 Standartlı C sınıfı yol profili cevapları incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda Arı Algoritmasının daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arı Algoritması, PSO, Çeyrek Araç Modeli, Süspansiyon Sistemi, Optimizasyon

Determining The Quarter Vehicle Model Design Parameters Using Bees Algorithm (BA) And Particle Swarm Optimization (PSO)

ABSTRACT: In this study, a quarter vehicle model that is widely used in vehicle dynamics studies is chosen for analysis. The quarter vehicle model used is created based on five design parameters, namely as the sprung and unsprung mass of the system, spring stiffness, damping coefficient and tire stiffness. These design parameters are selected to be determined by the proposed optimization algorithms. The objective of the optimization is to minimize the deviations in the suspension system in order to obtain better driving stability and comfort of the quarter vehicle suspension system on the chosen road profile. The optimum values of the design parameters are determined by using The Bees Algorithm (BA) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms executed in the MATLAB software environment. The quarter vehicle model block diagram is created within Matlab / Simulink and along with ISO 8608 Standard Class C road profiles. The responses of the model are then examined by using the determined optimum values. As a result of the simulations, it is observed that The Bees Algorithm gives more successful results compared to PSO. The obtained results are presented in tables and graphics.

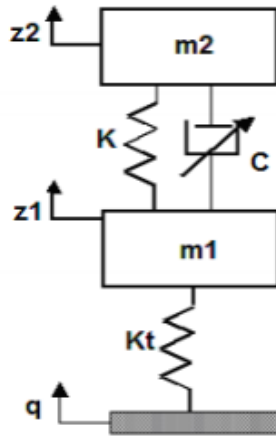
Key Words: The Bees Algorithm, PSO, Quarter Vehicle Model, Suspension System, Optimization

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişten günümüze kadar gelişen otomotiv sektörü arz talebe uyum sağlayabilmek adına sürekli değişim göstermiştir. Otomobillerin ilk üretim yıllarından bu yana müşteri istek ve talepleri, ana unsur olarak sürüş konforu ve performansı üzerine çalışmaları ön plana çıkarmıştır. Süspansiyon sistemleri yol ile araç arasındaki titreşimleri minimize ederek daha iyi sürüş performansı ve sürüş konforunu esas almaktadır. İki serbestlik derecesine sahip olan çeyrek araç modeli sistem modellemesini kolaylaştırarak optimizasyon ve kontrolcü tasarımı gibi uygulamalarda otomotiv endüstrisinin birçok alanında kullanılmaktadır (Türkdoğan, 2008; Çakan ve diğ., 2014).

Süspansiyon sistemi optimizasyonunda çeyrek araç modeli yarım araç modeli ve tam araç modeli olmak üzere matematiksel modellenerek optimum tasarımlar üzerine çalışılmıştır (Uddin, 2019; Gogaa ve Klúčik, 2012; Yurttaş, 2011). Farklı algoritmalar ve farklı optimizasyon seçenekleri ile süspansiyon sistemi optimum tasarımında birçok çalışma yapılmıştır. Çeyrek araç süspansiyon sistemi başta olmak üzere süspansiyon sistemi optimizasyon çalışmaları arasında Genetik Algoritma en çok kullanılan optimizasyon algoritması olarak gözlemlenmektedir (Gogaa ve Klúčik, 2012; Likaj ve diğ., 2010; Nagarkar ve diğ., 2018; Anirban ve diğ., 2016). Bunun yanı sıra Çok Amaçlı Optimizasyon (Multi-Objective Optimization), Guguklu Arama Optimizasyonu (Cuckoo Search Optimization), Sıralı Kuadratik Program (Sequential Quadratic Program, SQP), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) gibi süspansiyon sistemindeki matematiksel modelden elde edilen hareket denklemleriyle belirli yol profili üzerinde daha başarılı araç performansı ve sürüş konforu için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır (Gadhvia ve diğ., 2016; Koulocheris ve diğ., 2017; Florea ve diğ., 2016; Wong ve diğ., 2017; Likaj ve diğ., 2010; Wang ve diğ., 2015). Bu çalışmalarda genellikle lastik sertliği, yay sertlik katsayısı ve süspansiyon sönümleme katsayısı değerleri optimize edilmiş ve yol profili üzerindeki performansı incelenmiştir. Ayrıca süspansiyon sisteminde bulunan yay üzerine de Diferansiyel Gelişim Algoritması (Differential Evolution Algorithm) yöntemi ile optimizasyon çalışmaları yapılmıştır (Yıldız, 2018).

SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM)



Şekil 1. Çeyrek Araç Modeli

Figure 1. Quarter Vehicle Model

Bu çalışmada çeyrek araç süspansiyon sistemi matematiksel modeli kullanılmaktadır. Çeyrek araç süspansiyon modeli basitlikleri ve verdiği niteliksel olarak doğru bilgilerden dolayı tasarımın ilk aşamasında otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1'de Newton'un ikinci hareket kanunu kullanılarak elde edilen çeyrek araç modeli matematiksel modeli gösterilmektedir (Çakan ve diğ., 2014; Anirban ve diğ., 2016; Likaj ve diğ., 2010; Nagarkar ve diğ., 2018; Uddin, 2019).

Sistemin hareket denklemi:

$$m_1\ddot{z}_1 + C(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + K(z_1 - z_2) + K_t(z_1 - q) = 0 \quad (1)$$

$$m_2\ddot{z}_2 + C(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + K(z_2 - z_1) = 0 \quad (2)$$

Fourier denklem dönüşümü:

$$z_1(-\omega^2 m_1 + j\omega C + K + K_t) = z_2(j\omega C + K) + qK_t \quad (3)$$

$$z_2(-\omega^2 m_2 + j\omega C + j\omega + K) = z_1(j\omega C + K) \quad (4)$$

Model, tekerleğin süspansiyon sistemi ile araç gövdesinin çeyrek kısmına bağlandığı bir arabanın tek tekerleğini temsil etmektedir. Çizelge 1'de çeyrek araç süspansiyon sistemi fiziksel parametreleri verilmiştir (Likaj ve diğ., 2010).

Çizelge 1. Sistem Parametreleri

Table 1. System Parameters

Sembol	Açıklama
z_2	Gövdenin yer değişimi (m)
\dot{z}_2	Gövdenin hızı (m/s)
z_1	Tekerleğin yer değişimi (m)
\dot{z}_1	Tekerleğin hızı (m/s)
m_2	Gövde kütlesi (kg)
m_1	Tekerlek Kütlesi (kg)
K	Yay sertlik katsayısı (N/m)
K_t	Tekerlek sertlik katsayısı (N/m)
C	Sönümlenme katsayısı (Ns/m)

Yol düzensizliği, sürücü veya araç yapısının ana rahatsız edici kaynağını temsil etmektedir. Tasarım optimizasyonu amacıyla James'in ilkesine göre, yaylı kütle ivmesinin \ddot{z}_2 'nin ortalama karekökü (Root Mean Square, RMS) şu şekilde ifade edilebilir (Likaj ve diğ., 2010):

$$\sigma_{\ddot{z}} = \left\{ \pi R V \left[\frac{K_t C}{2m_2^{3/2} K^{1/2}} + \frac{(m_1 + m_2) K^2}{2C m_2^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

Süspansiyon çalışma alanının ortalama karekökü (RMS) f_d :

$$\sigma_{f_d} = \left\{ \pi R V \left[\frac{(m_1 + m_2)(m_2 K)^{1/2}}{2C m_2} \right] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

Bağlı dinamik lastik yükünün ortalama karekökü (RMS) şu şekilde hesaplanabilir:

$$\sigma_{F_d/G} = \left\{ \pi R V \left[\frac{K_t^2 m_1}{2C(m_1 + m_2)^2} + \frac{(m_1 + m_2) K^2}{2C m_2^2} - \frac{K_t K m_1}{C m_2 (m_1 + m_2)} + \frac{CK}{2m_1 m_2} \right] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Bu çalışmada kullanılan çeyrek araç modelde denklem 5, 6 ve 7 de geçmekte olan hız değeri $V = \frac{40m}{s}$ güç spektrumu düzensizlik katsayısı $R = 6.5 \times 10^{-6} m^3$ olarak alınmıştır (Likaj ve diğ., 2010).

ARI ALGORİTMASI (THE BEES ALGORITHM)

D. T. Pham ve arkadaşları tarafından ilk olarak 2006 yılında önerilen Arı Algoritması, arıların nektar, su gibi kaynakları arama davranışlarını sürü zekâsı kullanarak öğrenme, hatırlama ve bilgi paylaşma özellikleriyle en ilgi çekici çalışma alanlarından biri haline getirmiştir (Pham ve diğ., 2006). Bu algorithmada bal arılarının kaynak araştırma yapısına benzetilerek sezgisel bir bakış açısı yakalanmıştır. Teorik ve deneysel çalışmalar bir robot kolunun kontrolü için bulanık mantık ve PID kontrolcülerini Arı Algoritması ile tasarlayan Pham ve Kalyoncu bu alandaki çalışmaların temellerini atmışlardır (Pham ve diğ., 2008; Pham ve Kalyoncu, 2009). Daha sonra Arı Algoritması ile çalışmalar sürdürülerek Arı Algoritmasının diğer optimizasyon araçlarından daha ileride olduğu gözlemlenmiştir. Şen, Bilgiç ve Kalyoncu'nun çift ters sarkaç sisteminin denge ve konum kontrolünü arı algoritması ile LQR kontrolcü parametreleri üzerine çalışma yapılmıştır. Konum ve denge kontrolünde geleneksel yöntemlere nazaran Arı Algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Şen ve diğ., 2015; Şen ve Kalyoncu, 2016).

Arı Algoritması çalışma prensibinde birçok parametre yer almaktadır. Bunlar:

1. n : Kâşif arı sayısı
2. m : Ziyaret edilen n nokta içinden seçilen en uygun bölge sayısı
3. e : Seçilen m bölge içindeki elit bölge sayısı
4. ne_p : En iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı
5. ns_p : Kalan ($m-e$) bölgeye gönderilen arı sayısı
6. ngh : Bölge boyutu, (Bölge boyutunun birimi aranan parametrenin birimidir.)
7. itr : Durdurma kriteri/iterasyon sayısı



Şekil 2. Arı Algoritması Akış Şeması

Figure 2. The Bees Algorithm Flow Chart

Şekil 2'de Arı Algoritması akış şeması gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bu döngü optimizasyonun durdurma kriteri (itr) sağlanana kadar devam eder. Bu çalışmada yer alan ve deneme yanılma yoluyla seçilen, Arı Algoritması sistem parametreleri çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Çalışmada Kullanılan Arı Algoritması Sistem Parametreleri

Table 2. The Bees Algorithm System Parameters Used in the Study

itr	n	m	e	nep	nsp	ngh
30	30	8	5	7	8	0.01

PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, PSO)

1995 yılında J. Kennedy ve R. C. Eberhart tarafından geliştirilen parçacık sürü optimizasyonu, kuş ve balık sürüsü hareket ilkelerine temel alan sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Parçacık sürüsü algoritmasının temel avantajları basitlik, sağlamlık ve iyi yakınsamadır. Parçacık sürüsü algoritmasında parametrelerin tanımlanmasının daha sağlam bir şekilde kontrol edildiğini ve Genetik Algoritmadan daha basit bir şekilde seçildiğini bulmuştur. Bu algoritma balık, kuş gibi sürü halinde hareket eden popülasyonlarda çeşitli adaptasyonlara bağlı olarak birbirleri ile haberleşme hızını temsil eder ve temelinde her bir parçacık sürüdeki en iyi pozisyonu ayarlamak için önceki pozisyon tecrübelerinden faydalanır (Wang ve diğ., 2015).

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1 \text{rand} \frac{(p^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 \text{rand} \frac{(p_k^g - x_k^i)}{\Delta t} \quad (8)$$

Denklem 8’de PSO parçacık hız formülü verilmiştir. Bu denklemde yer alan PSO parametreleri çizelge 3’de yer almaktadır.

Çizelge 3. PSO Parametreleri

Table 3. PSO Parameters

Sembol	Açıklama
v	Hız
w	Eylemsizlik faktörü
c_1	Parçacığın kendi katsayısı
c_2	Sürüye bağlı katsayı
p^i	Parçacığın en iyi noktası
p_k^g	Sürünün en iyi noktası

Bu çalışmada yer alan ve deneme yanılma yoluyla seçilen, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması sistem parametreleri çizelge 4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. Çalışmada Kullanılan PSO Parametreleri

Table 4. PSO Parameters Used in Study

N	c_1	c_2	w	v_{min}	v_{max}
10	2	2	0.8	-5	+5

OPTİMİZASYON VE SİMÜLASYON SONUÇLARI (OPTIMIZATION AND SIMULATION RESULTS)

Bu çalışmada Arı Algoritması ve Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ile modellenen çeyrek araç süspansiyon sisteminin optimum tasarımı yapılmıştır. Sistemde amaç fonksiyonu olarak yaylı kütle

ivmesinin minimize edilmesi esas alınmıştır. Daha iyi sürüş konforu için bu değer minimum olması gerekmektedir. Ayrıca süspansiyon çalışma alanı ve dinamik lastik yükü sistem kısıtlaması olarak belirlenmiştir. Sistemde tasarım değişkenleri ve amaç fonksiyonu denklem 9'da yer almaktadır. Kısıtlar ise denklem 10 ve 11'de gösterilmektedir. Optimize edilecek tasarım parametrelerinin minimum ve maksimum değeri çizelge 5'de gösterilmektedir.

$$\sigma_{\ddot{z}}(m_1, m_2, K_t, K, C) = \left\{ \pi R V \left[\frac{K_t C}{2m_2^{3/2} K^{1/2}} + \frac{(m_1 + m_2) K^2}{2C m_2^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$\sigma_{\frac{F_d}{G}}(m_1, m_2, K_t, K, C) \leq 0.5 \quad (10)$$

$$\sigma_{f_d}(m_1, m_2, K_t, K, C) \leq 0.05 \quad (11)$$

Çizelge 5. Optimum Tasarım Değerleri (Likaj ve diğ., 2010)

Table 5. Optimum Design Values

	m_1	m_2	K_t	K	C
Min	83,2	509,6	559440	80480	2560
Max	124,8	764,4	839170	120720	3840

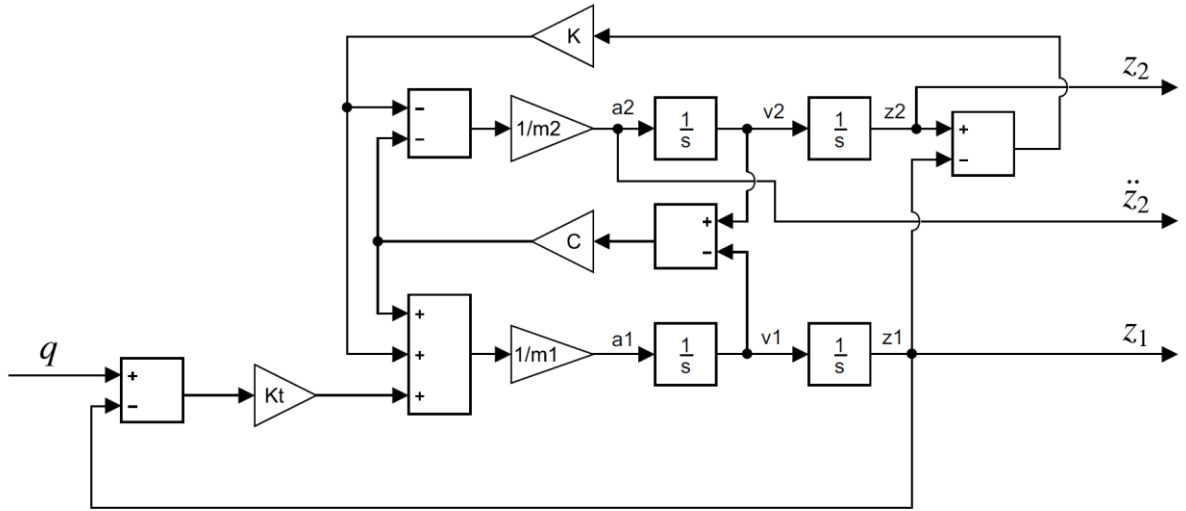
Belirtilen amaç fonksiyonu ve sistem kısıtları altında Arı Algoritması ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ile MATLAB programında çözdürülerek optimum sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen değerler çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Optimum Tasarım Değerleri

Table 6. Optimum Design Values

	BA	PSO
K	81646.59	92415.2358
C	3703.882	3712.709452
m_1	92.38365	111.5183263
m_2	742.9819	737.8823602
K_t	583585.2	570866.2107
$\sigma_{\ddot{z}_2}$	1.1247	1.2680

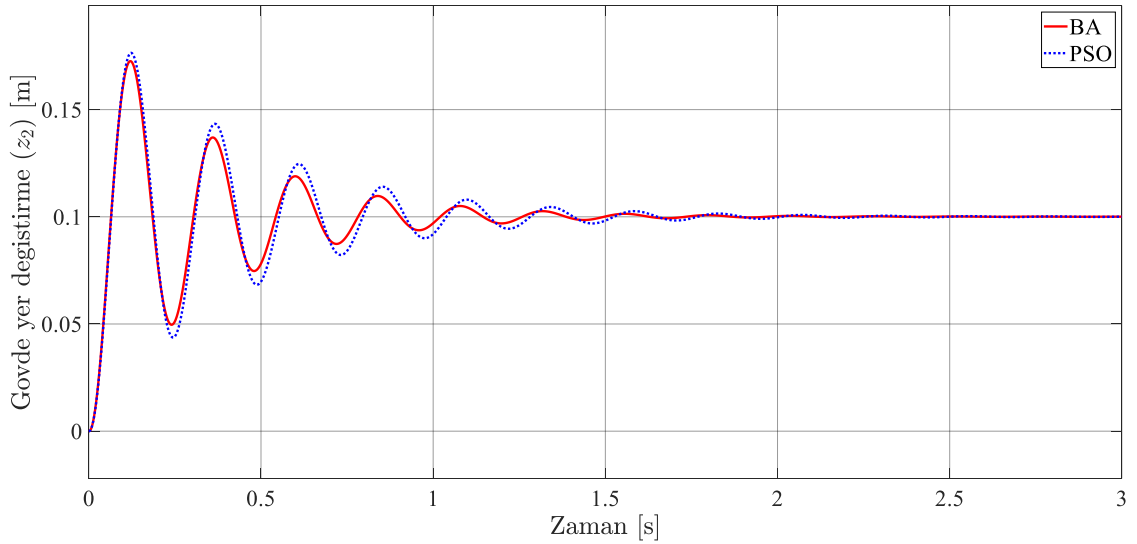
Arı Algoritması (BA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (PSO) ile optimize edilen değerlerle bu algoritmaların karşılaştırılması için çeyrek araç süspansiyon sistemi matematiksel modeli ilk olarak 10 cm derinliğinde bir çukura girmiş şekilde MATLAB/Simulink'te blok diyagram haline getirilmiştir. Şekil 3'te çeyrek araç süspansiyon sistemi blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3. Çeyrek Araç Modeli Blok Diyagramı

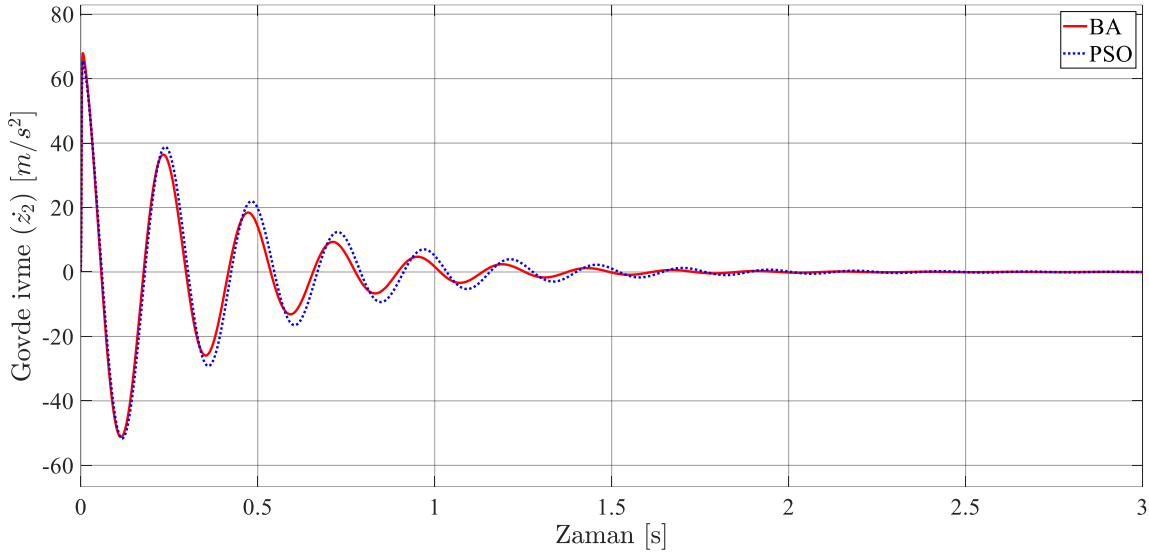
Figure 3. Quarter vehicle Model Block Diagram

Arı Algoritması ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (PSO) 10 cm'lik çukur değeri varsayılarak bu algoritmaların bu yol profili üzerindeki davranışları simule edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak irdelenmiştir. Gövde yer değıştirme (z_2), gövde ivme (\ddot{z}_2) ve tekerlek yer değıştirme (z_1) sonuçları Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla verilmiştir.



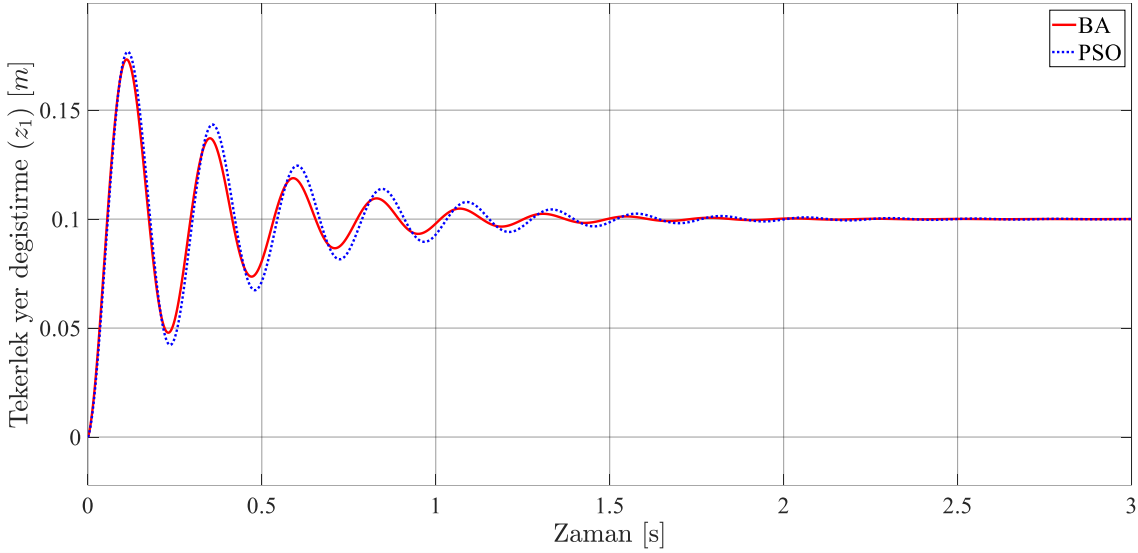
Şekil 4. Gövde Yer Değıştirme-Zaman Grafiği

Figure 4. Body Displacement-Time Plot



Şekil 5. Gövde İvme-Zaman Grafiği

Figure 5. Body Acceleration-Time Plot



Şekil 6. Tekerlek Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

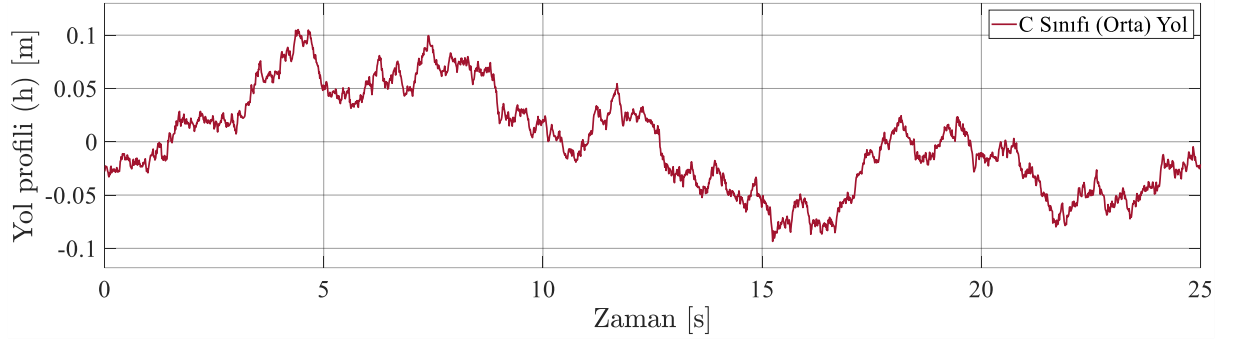
Figure 6. Wheel Displacement-Time Plot

Bu çalışmada algoritmaların daha verimli bir şekilde karşılaştırılabilmesi için optimize edilen değerler ile sistem modelinde ISO 8608 Standartlı yol profiline göre tekrar simüle edilerek çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. ISO 8608 Standartı günümüzde, yol sınıflandırmasına dayalı yol profilleri, mekanik ve inşaat yapılarının titreşim analizinde ve yol aracı-sürücü etkileşim sistemindeki çeşitli görevleri çözmek için simülasyon amacıyla kullanılmaktadır. Standart ISO 8608, dikey yer değiştirme gücü spektral yoğunluğuna (Power Spectral Density, PSD) dayalı uzunlamasına yol profillerinin yol sınıflandırmasını belirtir.

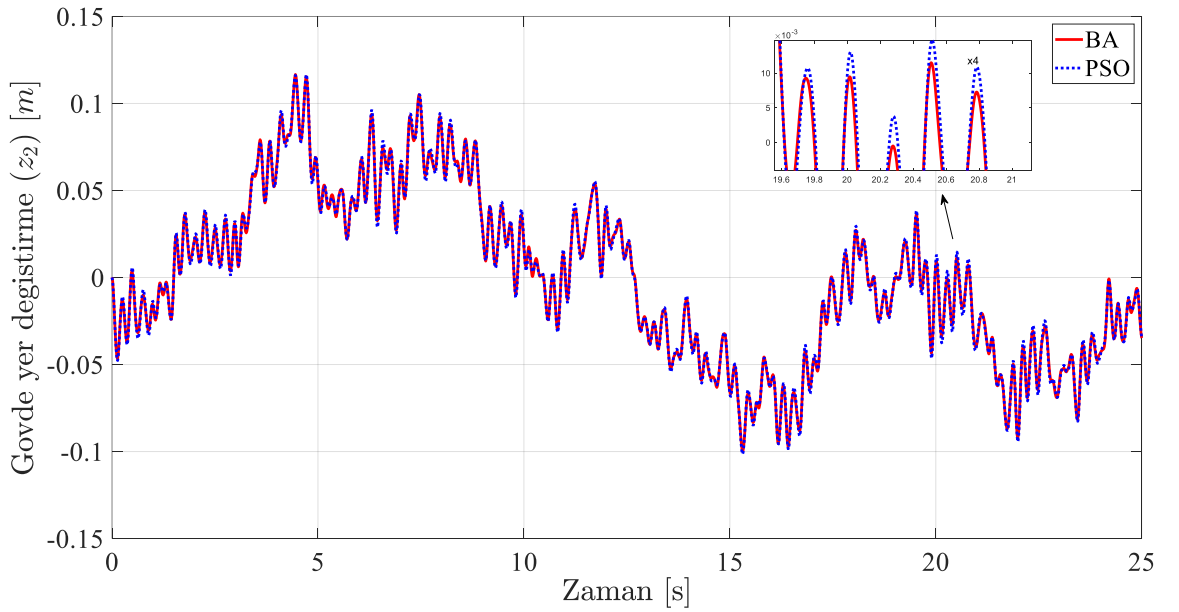
ISO 8608, çok iyi (Sınıf A), iyi (Sınıf B), ortalama (Sınıf C) vb. gibi sözlü olarak tanımlanmış yol sınıfları kategorilerini belirtmez. Bu sözlü kategoriler genellikle mevcut karayolu ağının düzgünlük seviyesi ile herhangi bir korelasyon olmaksızın kullanılır. ISO 8608'in öncülü, yol sınıflarına sözlü kategoriler atayan İngiliz Standartları Enstitüsü (BSI) teklifiydi (Múčka, 2018).

Bu çalışmada ISO 8608 yol sınıflandırması ortalama yol profili olan C sınıfı yol profili kullanılarak Arı Algoritması ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (PSO) karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de yol profili

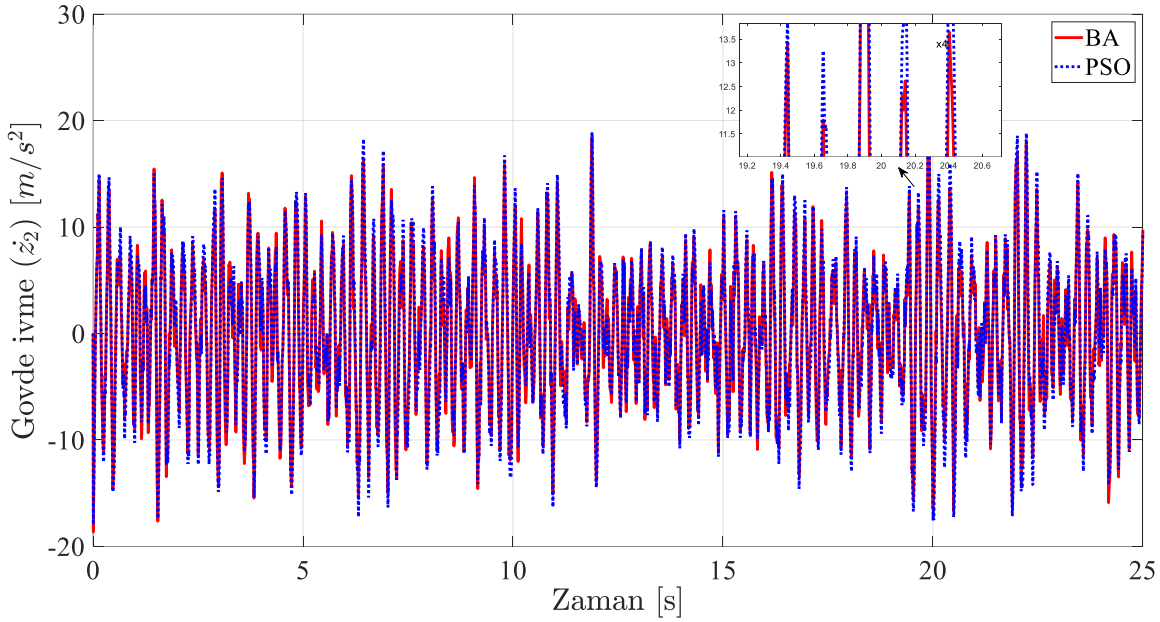
gösterilmiştir. Bu yol profili ile elde edilen cevaplar gövde yer değiştirme (z_2), gövde ivme (\ddot{z}_2) ve tekerlek yer değiştirme (z_1) sonuçları Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 7. Yol profili-Zaman Grafiği
Figure 7. Road Elevation-Time Plot

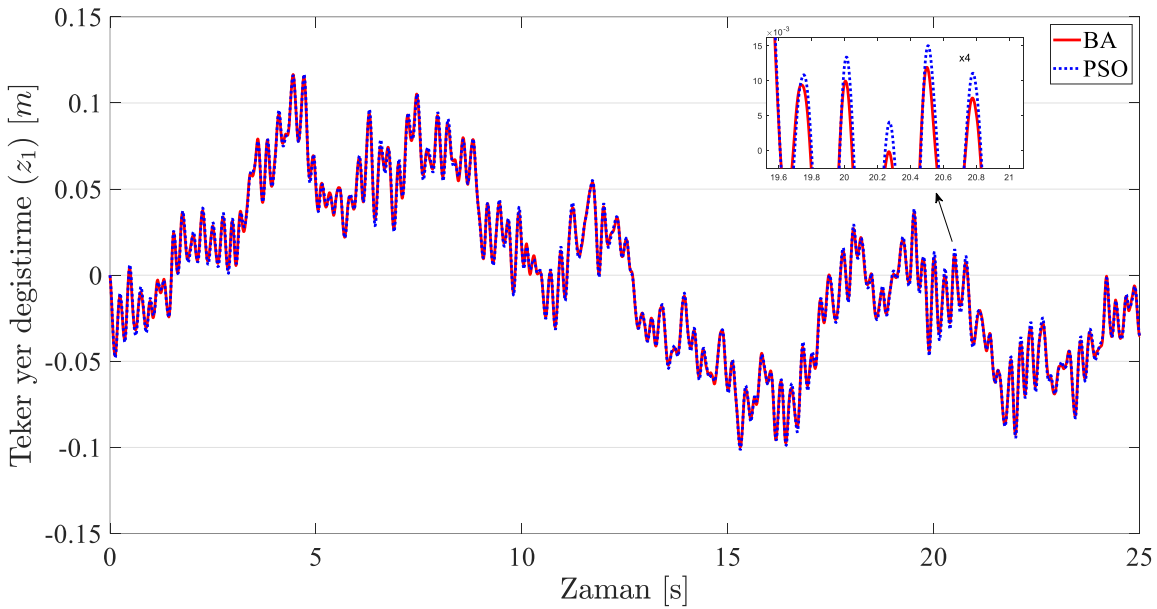


Şekil 8. Gövde Yer Değiştirme-Zaman Grafiği
Figure 8. Body Displacement-Time Plot



Şekil 9. Gövde İvme-Zaman Grafiği

Figure 9. Body Acceleration-Time Plot



Şekil 10. Teker Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Figure 10. Wheel Displacement-Time Plot

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan bu çalışmada çeyrek araç süspansiyon sistemi matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sistem gereksinimi belirlenerek amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar çıkartılmıştır. Kabul edilen değerler gerekli literatür taraması sonucu elde edilmiştir. Bu sistemin optimizasyonunda Arı Algoritması (The Bees Algorithm, BA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (Particle Swarm Optimization, PSO) kodları MATLAB programında kodlanmıştır ve bu programda çözümü istenmiştir. Elde edilen değerleri karşılaştırmak adına ilk olarak varsayılan değer 10 cm'lik bir çukur, daha sonra da ISO 8608 yol sınıflandırmasından C sınıfı bir yol profili belirlenerek MATLAB/Simulink'te blok diyagram oluşturulmuştur.

Simülasyon sonucunda yol yüksekliği-zaman, gövde yer değiştirme-zaman, tekerlek yer değiştirme-zaman ve gövde ivmesi-zaman grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen bu grafiklerde Arı Algoritması ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması karşılaştırılmıştır ve gözle görülür şekilde Arı Algoritmasının, Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiği ve tasarım optimizasyonu çalışmalarında da başarılı bir şekilde kullanılabileceği gözlenmiştir.

İlerleyen çalışmalarda diğer meta sezgisel algoritmalar üzerinde çalışmalar yapılarak Arı Algoritması ile karşılaştırmalar yapılması planlanmaktadır. Ayrıca diğer çalışmalar da yarım araç süspansiyon modeli ve tam araç süspansiyon modelleri arı algoritması ile optimize edilerek bu çalışmaların daha netlik kazanması adına sistem farklılıkları gözlenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- Anirban. C. Mitraa, Gourav. J. Desai, Saaish. R. Patwardhan, Parag H. Shirke, Waseem M. H. Kurnee, Nilotpal Banerjee, 2016, "Optimization Of Passive Vehicle Suspension System By Genetic Algorithm" *Procedia Engineering* 144 pp 1158 – 1166
- Çakan, A., Botsalı, F. M., & Tinkir, M., 2014, "Modeling and controller comparison for quarter car suspension system by using PID and Type-1 fuzzy logic" In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 598, pp. 524-528). Trans Tech Publications Ltd.
- Florea A., Cofaru I. I., Roman L., Cofaru N., 2016 "Applying the Multi-objective Optimization Techniques in the Design of Suspension Systems" *Journal of Digital Information Management* Vol.14 No.6, pp 351-367
- Gadhvia B., Savsania, V, Patela V., 2016, "Multi-Objective Optimization of Vehicle Passive Suspension System using NSGA-II, SPEA2 and PESA-II" *Procedia Technology* 23 pp 361 – 368
- Gogaa V., Klúčík M., 2012, "Optimization of vehicle suspension parameters with use of evolutionary computation", *Procedia Engineering* 48, 174 – 179
- Koulocheris D., Papaioannou G. and Christodoulou D., 2017 "An approach for multi-objective optimization of vehicle suspension system" *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 252 (2017) 012037 pp 1-8
- Likaj R., Shala A., Bruqi M., Qelaj M., 2010, "Optimal Design Of Quarter Car Vehicle Suspension System", *TMT 2010, Mediterranean Cruise*, 11-18 September 2010 pp 417-420
- Múčka, P., 2018, "Simulated road profiles according to ISO 8608 in vibration analysis" In *Journal of Testing and Evaluation*, ISSN 0090-3973, Vol. 46, No. 1, pp. 405-418.
- Nagarkar M. P., Bhalerao Y. J., Patil G. J. V. and Patil R. N. Z., 2018. "GA-based multi-objective optimization of active nonlinear quarter car suspension system—PID and fuzzy logic control" Nagarkar et al. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*
- Pham D.T. and Kalyoncu M., 2009, "Optimisation of a Fuzzy Logic Controller for a Flexible Single-Link Robot Arm Using the Bees Algorithm", Cardiff CF24 3AA, Cardiff University, UK, 2009 IEEE.
- Pham D.T., Koç E., Ghanbarzadeh A., Otri S., Rahim S., Zaidi, M., 2006, "The Bees Algorithm A Novel Tool for Complex Optimisation Problems" *2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems*, 454-461.
- Pham D.T., Koç E., Kalyoncu M., Tinkır M., 2008, "Hierarchical PID Controller Design for a Flexible Link Robot Manipulator Using the Bees Algorithm", *Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, Sakarya, Turkey, Ekim 14-16, 757-765.
- Şen, M. A., Bilgiç, H. H., Kalyoncu, M. 2016. "Çift Ters Sarkaç Sisteminin Denge ve Konum Kontrolü için Arı Algoritması ile LQR Kontrolcü Parametrelerinin Tayini, " *Mühendis ve Makina*, cilt 57, sayı 679, s. 53-62.
- Şen M. A ve Kalyoncu M., 2015 "İki Tekerlekli Kendi Kendini Dengeleyen Robotun Yörünge Takibi için Arı Algoritması kullanarak LQR Kontrolcü Tasarımı" *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu*, İzmir, pp 1-7

- Türkdođru N. G. 2008, "Aktif Süspansiyon Sistemlerinde Hata Tespiti ve Analiz", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Uddin N., 2019, "Optimal Control Design of Active Suspension System Based on Quarter Car Model" Jurnal Infotel Vol.11 No.2 pp 55-61
- Wang L., Lv Z. and Li Q., 2015 "Road friendliness optimization of heavy vehicle suspension based on particle swarm algorithm" 4th International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (ICCMCEE 2015) pp 1328-1333
- Wong P. K., Ma X., Zhao J., Xie Z., Zhao R., 2017 "Damping Force Control of A Semi-active Suspension System Using Cuckoo Search Optimized PID Method" Advances in Engineering Research (AER), volume 102 269 Second International Conference on Mechanics, Materials and Structural Engineering (ICMMSE 2017) pp 269-273
- Yıldız B. S., 2018 "Optimal Design Of Automotive Suspension Springs Using Differential Evolution Algorithm" Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, Vol. 23, No. 3, pp 207-214
- Yurttaş A., 2011, "Araç Matematiksel Modelinin Oluşturulması ve Tasarım Parametrelerinin Sezgisel Yöntemlerle Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.



SPORCULARIN KALP ATIM HIZININ ESP-NOW KULLANILARAK KABLOSUZ İLETİMİ

¹Ömer Muhsin DÜNDAR , ²Ahmet AYDIN 

¹Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE
²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Adana, TÜRKİYE
¹omdundar@firat.edu.tr, ²aaydin@cu.edu.tr

(Geliş/Received: 12.02.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.05.2021)

ÖZ: Bilimsel yaklaşımlarla antrenman programları hazırlamak ve sporcu egzersiz verilerini izlemek için geliştirilen teknolojiler günümüzün popüler konuları arasında yer almaktadır. Uygun yük izleme, bir sporcunun antrenman programına uygunluğunu belirlemeye, aşırı yüklenme ve yaralanma riskini en aza indirmeye yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, sporda kalp atış hızı takibi, sporcunun durumunu izlemek için invazif olmayan, zaman açısından verimli ve düşük maliyetli en kolay yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sporcudan kalp atım hızı bilgisini almak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır, ancak en doğru sonucu doğrudan göğüs üzerine takılan EKG tabanlı kemerler vermektedir. Bu yöntem ile elde edilen veriler genellikle sporcunun kolunda bulunan saat veya benzeri aparatlar yardımı ile takip edilmekte, uzaktan takibi doğrudan yapılamamaktadır. Bu çalışma sonucunda, EKG tabanlı göğüs kemerinden alınan veriler, ESP-NOW iletişim protokolü ile uzakta bulunan antrenörlere aktarılarak sporcuların anlık kalp atım hızı değişimleri gözlenebilecektir. Bu iletişim protokolünün sunduğu bazı önemli avantajlar ise, ESP32 içinde bulunan Wi-Fi donanımını modem gibi ekstra gereksinimlere ihtiyaç duymadan kullanması, hızlı ve düşük güç tüketimine sahip olmasıdır. Dolayısıyla, harici bir RF modülünün neden olacağı ekstra maliyet ve boyuttan kaçınılarak yüksek performanslı bir sistem ucuz ve küçük bir boyutta geliştirilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalp atım hızı, Kablosuz haberleşme, ESP-NOW, Giyilebilir cihazlar

Heart Rate in Athletes and Wireless Transmission Using ESP-NOW

ABSTRACT: Technologies developed to prepare training programs with scientific approaches and monitor athlete exercise data are among today's popular topics. Appropriate load monitoring helps determine an athlete's fitness for the training program and minimize overload and injury risk. In this context, tracking HR in sports is the cheapest, time-efficient, and easiest non-invasive method to monitor the athlete's condition. Various methods are used to obtain HR from the athlete, but ECG-based belts, which are directly wearable on the chest, give the most accurate result. The data obtained by this method are usually monitored with a watch or similar apparatus on the arm of the athlete, and remote monitoring cannot be performed directly. As a result of this study, the data obtained from the ECG-based chest strap can be transferred to a remote receiver using ESP-NOW communication protocol, and instant HR changes of the athletes can be observed. Some of the important advantages of this protocol are that it uses the Wi-Fi hardware of ESP32 without the need for additional requirements such as a modem, it is fast, and low power consumption. Therefore, an external RF module's extra cost and size are avoided to have a minimal cost and size while keeping the system performance high.

Key Words: Heart rate, Wireless communication, ESP-NOW, Wearable devices

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalp atım hızı (KAH); kalbin venöz kan olarak ifade edilen oksijenlenmemiş kanı akciğerlere, oksijenli kanı ise sistemik dolaşıma pompaladığı ritmi gösterir. Kalp atım hızı izleme, son yıllarda kardiyovasküler zindeliğin ve dayanıklılığın en önemli göstergelerinden biri haline gelmiştir. KAH, dinlenme sırasında fitness/zindelik düzeyini ve herhangi bir rahatsızlığın (kardiyovasküler hastalıklar, stres vb.) varlığını gösterirken; egzersiz sırasında ise fitness/zindelik düzeyini ve egzersiz yoğunluğunu göstermektedir. Bu önemli fizyolojik parametreyi izlemenin en yaygın uygulamalarından birisi antrenman yoğunluğu (training intensity) ve sporcuların iç yük (internal load) durumunu takip etmek için kullanıldığı spor uygulamalarıdır. Yapılan çalışmalarda KAH ile oksijen tüketimi arasında doğrusal bir ilişkinin bulunduğu (Hopkins, 1991), KAH değişiminin aşırı yüklenmelerin saptanması ve önlenmesinde rol oynadığı (Achten ve Jeukendrup, 2003) ve maksimum KAH verisinin de antrenman yoğunluğunun bir göstergesi olduğu ifade edilmektedir (Borresen ve Lambert, 2008). Aynı zamanda antrenman yoğunluğunu takip edebilmek için kullanılabilecek diğer yöntemlere (oksijen alımı ölçümü, kan laktat konsantrasyonu, kas fonksiyon ölçümleri gibi) göre, KAH'nın izlenmesi daha kolaydır. KAH izlemenin giyilebilir tasarıma daha elverişli ve daha az maliyetli olması antrenman yoğunluğu izleme açısından bu yöntemi öne çıkarmaktadır.

Takım sporlarında bir antrenman programı oluşturulurken antrenman sıklığı ve süresi kolaylıkla kontrol edilebilirken antrenman şiddetini kontrol etmek için KAH monitörleri kullanılabilir (Bizati, 2013). Bu monitörler ile sporcular üzerindeki iç yüklenme şiddeti ve aşırı yüklenme sonucu antrenmanın yıkıcı olmaya başlamasını ifade eden sür-antrene durumu kontrol altında tutulabilmektedir. Egzersiz/antrenman seviyelerini kontrol altında tutmak ve fiziksel aktiviteyi ölçmek için çeşitli giyilebilir KAH cihazları tasarlanmıştır. Bu cihazlar temel olarak optik veya EKG sensör prensibiyle çalışmaktadır. Optik sensör kullanılan cihazlarda fotopletizmografi (PPG) metodu uygulanmaktadır. Bu metod, sensörün yerleştirildiği yerden akan kanın hacminin optik olarak izlenmesi sonucu nabızın belirlenmesi prensibine dayanır. Bunlar parmağa veya kulağa takılan cihazlar, saatler ve bilek bantları olarak tasarlanabilmektedir (Spierer ve diğ., 2015; Hettiarachchi ve diğ., 2019; Almeida ve diğ., 2019). Öte yandan EKG tabanlı KAH monitörleri ise göğüs kemeri sensörüne yerleştirilmiş kuru elektrotlardan oluşmaktadır (Sartor ve diğ., 2018). Bu iki temel yöntemle alakalı yapılan bir çalışmada EKG tabanlı KAH cihazı ile optik sensör tabanlı KAH cihazları karşılaştırılmıştır. Katılımcılara standart EKG elektrotları ve EKG tabanlı Polar H7 göğüs kemeri yerleştirilmiş; aynı zamanda her katılımcıya optik sensör tabanlı KAH bilek cihazları takılmıştır. Wang ve diğ. (2016) tarafından yapılan bu çalışma sonucunda, EKG tabanlı KAH cihazı daha doğru sonuçlar vermiş ve bu yöntemin antrenman takibi gibi profesyonel uygulamalarda daha kullanılabilir olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 1. EKG Tabanlı KAH Monitörleri ile Optik Tabanlı (PPG) KAH Monitörlerinin Elektrokardiyogram ile Doğruluğunun Karşılaştırılması (Wang ve diğ., 2016)

Table 1. Comparison of ECG-Based HR Monitors and Optic-Based (PPG) HR Monitors with Electrocardiogram Accuracy

Cihaz	Elektrokardiyogram (EKG) ile uyum korelasyonu
Polar H7	0.99 (0.987-0.991)
Apple Watch	0.91 (0.884-0.929)
Mio Fuse	0.91 (0.882-0.929)
Fitbit Charge HR	0.84 (0.791-0.872)
Basis Peak	0.83 (0.779-0.865)

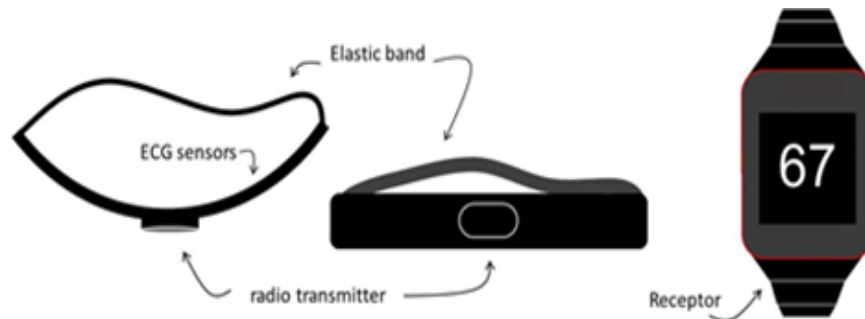
Piyasada bulunan EKG tabanlı KAH göğüs kemerleri (Polar H7-H10, Wahoo Tickr X, Garmin, Kalenji gibi) kişiden topladıkları verileri bluetooth veya ANT+ ile saat, bisiklet monitörleri, telefon, tablet gibi cihazlara kısa mesafeler (10-20 metre) içerisinde aktarabilmekte ve bu cihazlar yardımıyla okunabilmektedir. Ancak bireysel veya takım sporlarında, antrenörün iç yük ve antrenman şiddetini kontrol altında tutabilmesi için antrenman ve egzersiz sırasında sporcunun kalp atım hızını takip

edebilmesi gerekmektedir. Bunun için çeşitli kablosuz haberleşme yöntemleri kullanılabilir. Kablosuz haberleşme yöntemlerine örnek olarak Wi-Fi, Bluetooth, RF, Zigbee, GSM/GPS verilebilir. Bu araç ve yöntemlerin bazı dezavantajları mevcuttur. Örneğin; Wi-Fi bir yönlendirici (roter ya da modem) diğer bir deyişle erişim noktasına ihtiyaç duyar. Diğer standartlara göre yüksek güç tüketimine sahiptir. Ayrıca Wi-Fi cihazların çalıştığı frekans düzeyleri lisans gerektirmeden, diğer kablosuz cihazlarla çakışabilmekte, bu da iletişimi etkileyebilmekte hatta engelleyebilmektedir. Başka bir kablosuz araç olan Bluetooth daha kısa mesafelerde kullanışlı iken, RF modüller genellikle bir mikrodenetleyiciyle birlikte kullanılmaktadır. ZigBee ise kullanılan sisteme kıyasla yüksek maliyeti ile ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak EKG tabanlı göğüs kemerinden veriler çekilebilir ve aktarılabilir. Ancak bu çalışmada kullanılan yöntem ve araçlarla yukarıda bahsedilen dezavantajlar ortadan kaldırılmıştır. Oluşturulan sistem ile sporcunun KAH bilgisi ESP-NOW haberleşme protokolü ile kablosuz, hızlı, güvenilir, düşük maliyetli ve ekstra donanım kullanılmadan antrenör ekranında yansıtılacak şekilde aktarılmıştır. Bu sayede sporcunun KAH verileri uzak mesafede bulunan antrenörlerine iletilebilmiş ve gerçek zamanlı olarak takibi sağlanmıştır.

Bazı rahatsızlıkların (taşikardi, aritmi gibi) takibi, spor biliminde antrenman yoğunluğu seviyesinin ölçülmesi ve performansın takibi gibi birçok alanda kullanılan KAH verisi önemli bir parametre olarak literatürde (Laukkanen ve Virtanen, 2011; Gıllınoğlu ve diğ., 2017) yer almaktadır. EKG tabanlı göğüs kemeri sistemlerinde KAH verilerinin Bluetooth, ANT+ ile çok kısa mesafelerde veri iletimi veya ekstra donanım kullanılarak uzak mesafede bir iletişim kurulabilmektedir. Bu çalışmada EKG tabanlı göğüs kemerinden yine sporcunun üzerinde bulunan küçük boyuttaki ESP32 modülü yardımıyla alınıp (BLE teknolojisi) aynı modül üzerinden ESP-NOW protokolü kullanılarak uzak mesafedeki antrenör veya sağlık personellerine ekstra bir donanım gerektirmeden KAH aktarılabilmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada oluşturulan sistemin donanım ve boyut olarak giyilebilir teknolojiye uygun olması, ESP32 üzerindeki diğer özellikler (bluetooth, Wi-Fi, sıcaklık, dokunma, IR sensörü vb.) bakımından kolaylıkla geliştirilebilir olması ve uygun maliyeti bu tasarımı ön plana çıkarmaktadır.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Günümüzde KAH tespiti, son yıllarda giyilebilir olarak iki tür teknoloji ile gerçekleşmektedir: optik sensör (fotoplektizmografi) ve EKG (elektrokardiyogram). EKG tabanlı KAH monitörleri göğüs kemeriyle çalışırken (Şekil 1); optik sensörler genellikle bilek cihazları olarak kullanılmaktadır (Hettiarachchi ve diğ.,2019; Almeida ve diğ., 2019).



Şekil 1. EKG tabanlı KAH monitörünün temel yapısal bileşenleri (Almeida ve diğ., 2019)

Figure 1. Basic structural components of an ECG-based HR monitör

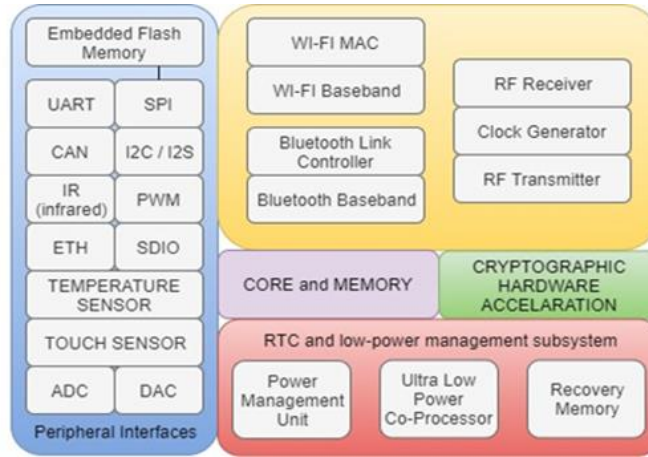
Şekildeki örnek sistemde sporcunun bileğindeki saat ile kontrol sağlanmakta, antrenör veya diğer profesyoneller ise o saat üzerinden aralıklı zamanlarla bakabilmekte veya daha sonra kayıt üzerinden KAH verisini inceleyebilmektedir. Bu makalenin amacı ise; şekilde görülen EKG tabanlı KAH monitörlerinde kullanılan saat ve benzeri cihaz ihtiyacı duyulmadan, verileri uzak mesafedeki kişilere (antrenör, sağlık ekibi gibi) düşük güç tüketimi ile kablosuz olarak gönderileceği, antrenör veya diğer profesyonellerin anlık olarak takip edebileceği gerçek zamanlı bir sistemi tasarlamaktır. Kendi üzerinde

hem kemer ile haberleşmeye olanak sağlayacak BLE, hem de uzun mesafe RF haberleşmeye olanak sağlayan modülleri bulunan ESP32 tercih edilmiştir. Böylelikle önerilen sistem, BLE ve RF modüllerini ayrı alıp mikrodenetleyici ile kontrol edildikleri çalışmalara göre maliyet ve boyut açısından ciddi avantajlar sunmuş olacaktır. Bu sistemde kullanılacak iletişim ise kablosuz haberleşmede yeni bir ufuk açan ESP-NOW protokolüdür. Literatürde spor uygulamaları açısından bir örneği bulunmayan ESP-NOW iletişimi az sayıda çalışmada (Hoang ve diğ., 2019; Khanchuea ve Siripokarpirom, 2019; Yukhimets ve diğ., 2020) yer bulmuştur. Bu çalışmanın bir diğer amacı da spor alanında uygulamalar için bu sistemin çok avantajlı olduğunu belirtmektir.

Bu sistemde ESP-NOW ile uyumlu çalışabilen iki adet ESP32 modülü, BLE teknolojisi ve KAH verisini algılayan göğüs kemeri kullanılmaktadır.

ESP32

ESP32, ESP8266'nın yerine geçen düşük maliyetli bir mikrodenetleyicidir. Şangay'da bulunan bir şirket olan Espressif System tarafından 2016 yılında tasarlanan ve üretilen ESP32, IoT (Internet of Things), mobil ve giyilebilir uygulamalar için önemli özellikler ve işlevler sunmaktadır.



Şekil 2. ESP32 Donanım Blok Diyagramı

Figure 2. ESP32 Hardware Block Diagram

Şekil 2’de gösterildiği üzere teknik özellik bakımından; işlemcisinin 240 MHz ve çift çekirdekli olması, 520KB RAM ve ADC, DAC, I2C, I2S, UART, SPI, GPIO, RF, Wi-Fi ve Bluetooth gibi çok çeşitli opsiyonlarına sahip olması ve uygun maliyeti nedeniyle oldukça kullanışlıdır. Ek olarak bu kart üzerinde, ESP32'nin uyku modunda 1 mA'dan daha düşük bir enerjiyle çalışmasını sağlayan Güç Yönetim Birimi (PMU) ve Ultra Düşük Güçlü Yardımcı İşlemci bulunmaktadır. Bu özellik ESP32'yi düşük güçlü uygulamalar için en uygun seçim haline getirmektedir. Uygun maliyeti (yaklaşık 50 TL), düşük güç tüketimi, üzerinde bulunan farklı opsiyonlar (Wi-Fi, Bluetooth vd.), az gecikme süresi ve kolay programlanabilir (Arduino, JavaScript, Python, IDF) olması bu modülün ön plana çıkan önemli özellikleridir. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı, üzerinde hem kemer ile haberleşmeyi gerçekleştirecek BLE, hem de uzun mesafe haberleşmeye olanak sağlayacak yeni bir protokol olan ESP-NOW'ı desteklediği için ESP32 modülü tercih edilmiştir. Bu modülün boyutunun küçük olması, az enerji tüketimine olanak sağlaması ve maliyetinin düşük olması da önerilen sistem için oldukça önemlidir.

Düşük Enerji Bluetooth (BLE) (Bluetooth Low Energy (BLE))

Düşük Enerji Bluetooth (BLE); sağlıkta, sporda, güvenlikte ve ev otomasyon sistemlerinde geliştirme yapan Bluetooth Special Interest Group (SIG) tarafından piyasaya sunulan kablosuz bireysel alan ağı

teknolojisidir. BLE, Klasik Bluetooth'un bir alt grubu olmakla birlikte Bluetooth 4.0 sürümünün özelliklerinin önemli bir parçasıdır.

Klasik Bluetooth kesikli olmayan yani devamlı veri akışı için tasarlanmışken; BLE ise uzun aralıklarla ani yani kesikli veri akışı için tasarlanmıştır. Örneğin, kulaklıktan müzik dinlerken sürekli bir veri akışı olurken; TV kanallarını değiştirirken veya bir robotu komutlarla yönlendirirken kesikli bir veri akışı olur (Dündar, 2020). Bu da enerjinin daha verimli kullanılması gereken uygulamalarda BLE'nin avantajını göstermektedir. BLE ile IoT uygulamalarında (akıllı ev, sağlık uygulamaları, giyilebilir uygulamalar gibi) enerji tüketimi önemli derecede azalmaktadır. Bu yüzden IOT cihazlarda BLE tercih edilmektedir.

Çizelge 2. BLE ile Klasik Bluetooth karşılaştırması

Table 2. BLE vs Classic Bluetooth

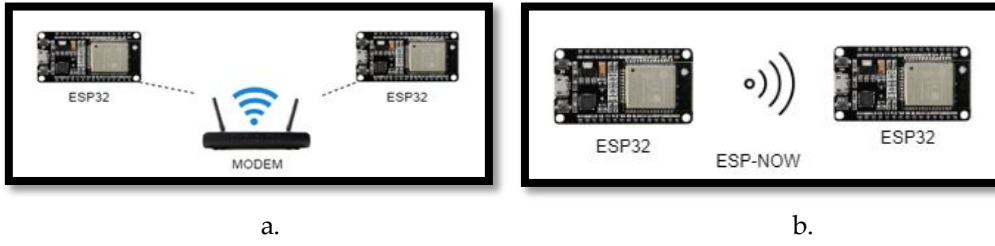
Özellik	BLE	Klasik Bluetooth
Enerji Tüketimi	15mA'den daha düşük	30mA'den daha düşük
Veri Hızı	1 Mbps	700 Kbps
Menzil	Kapalı alanda 50 m Açık alanda 150 m	30 m'den kısa
RF Frekansı	2.4 GHz	2.4 GHz
Gecikme süresi	3 ms	100 ms

ESP32 modülü üzerinde bulunan Bluetooth özelliği sayesinde, göğüs kemerinden alınan veriler BLE aracılığıyla sporcunun üzerinde bulunan ESP32'ye aktarılmıştır. BLE'nin önerilen sistem için avantajı Çizelge 2'de gösterildiği gibi enerji tüketiminin çok düşük olması ve KAH göğüs kemeri ile uyumlu çalışabilmesidir.

ESP-NOW

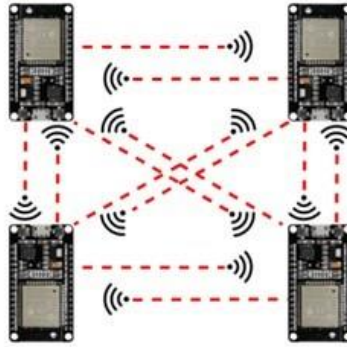
ESP-NOW, 2018 yılında Espressif tarafından tanıtılan bir tür bağlantısız Wi-Fi iletişim protokolüdür. ESP-NOW, P2P (Peer to Peer) protokolü özelliğine sahip olup ilk olarak ESP32 için yayınlanmıştır (Hoang ve diğ., 2019). Bu yöntemle P2P'nin yanı sıra çok sayıda cihaz arasında düşük güçlü bir iletişim sağlanabilmektedir. ESP-NOW'da, veriler cihaza özgü bir eylem çerçevesinde kapsüllenir ve bir Wi-Fi cihazından (ESP32, ESP8266) diğerine bağlantı olmadan iletilir. ESP-NOW'ın Wi-Fi'den farkı erişim noktasına ve yönlendiriciye (modem, roter) ihtiyaç duymadan, daha hızlı ve daha az güç tüketimiyle iletişimi gerçekleştirebilmesidir.

Bir denetleyiciyi modem üzerinden diğerine bağlayarak iletişimin gerçekleştiği Wi-Fi'nin aksine (Şekil 3.a), ESP-NOW iki veya daha fazla mikro denetleyiciyi (ESP32, ESP8266) modem veya farklı bir donanım doğrudan bağlamadan iletişimi sağlayan özel bir protokol (Şekil 3.b) kullanır. Wi-Fi aracının gereksinimlerin çok olması, lisans gerektirmeyen frekans seviyelerinde çalıştığından diğer kablosuz araçlarla çakışabilmesi, iletişim kalitesi ve hızının diğer radyo sinyallerinden etkilenmesi, yüksek güç tüketimi gibi olumsuzluklarından dolayı; ESP-NOW protokolünde gereksinimlerin çok daha az, güç tüketiminin çok daha düşük ve alıcının kimliği olarak adlandırılan MAC (Media Access Control) adresini tanımlanarak daha güvenilir olması belirli uygulamalarda bu yöntemi daha avantajlı kılmaktadır.



Şekil 3. a. Wi-Fi ile iletişim, b. ESPNOW protokolü ile (P2P) iletişim

Figure 3. a. Communication with Wi-Fi, b. Communication with ESPNOW protocol

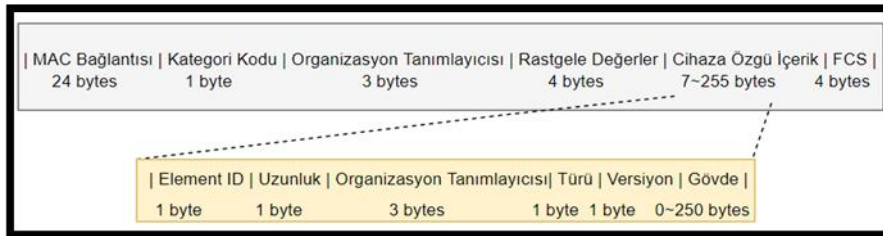


Şekil 4. ESP-NOW ile ağ yapısı iletişimi

Figure 4. Network structure communication with ESP-NOW

Bu protokol, genellikle kablosuz farelerde kullanılan düşük güçlü, 2.4 GHz kablosuz bağlantıya benzer şekilde çalışmaktadır. Bu nedenle, iletişimden önce cihazlar eşleşmekte ve eşleşme sonrasında bağlantı güvenli ve kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Bir defa eşleştirme yapıldıktan sonra bağlantı kalıcı hale gelmektedir. Yani, cihazlardan biri güç kaybettiğinde veya sıfırlandığında, cihaz yeniden başlatıldığı anda otomatik olarak eşine bağlanmaktadır. ESP-NOW çok yönlü kullanılabilen olup, farklı kurulumlarda tek yönlü, çift yönlü veya ağ yapısı (Şekil 4) şeklinde iletişim kurabilmektedir.

ESP-NOW ile 250 bayta kadar şifreli veya şifresiz iletişim gerçekleştirilebilmektedir. ESP-NOW, verileri iletmek amacıyla cihaza (vendor) özgü bir eylem çerçevesi kullanmaktadır. Tanımlı ESP-NOW bit hızı 1 Mbps olarak belirlenmiştir. Cihaza (ESP32) özgü eylem çerçevesinin biçimi Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Cihaza özgü eylem çerçevesinin biçimi (ESP-IDF Programming Guide, 2019)

Figure 5. Format of the vendor-specific action frame

ESP-NOW herhangi bir yönlendirici gerektirmediğinden (Wi-Fi modemi) gereksinimleri son derece azdır. Şekil 5'te görülebileceği gibi, tüm uygulama paketlenir ve daha sonra bir cihazdan diğerine/diğerlerine iletilir. Bu cihaza özgü paketleme, diğer cihazlar tarafından anlaşılma riskini azaltarak daha güvenli bir iletişime olanak tanır. Cihaza özgü içerik altında yer alan bölüm ise iletim için gereken bilgileri tutan paketin en önemli parçasıdır. Bu kısımda yer alan gövde ise ESP-NOW verilerini içermektedir.

EKG Tabanlı KAH Monitörü (ECG Based HR Monitor)

Antrenman ve egzersiz sırasında KAH'yi takip edebilmek için en güvenilir yol EKG tabanlı KAH göğüs kemerleridir. Bu çalışmada Şekil 6'da görülen uygun maliyetli bir cihaz olan Kalenji marka göğüs kemerini tercih edilmiştir. Bu cihaz yakın çevrede bulunan uyumlu cihazlarla (saat, tablet, telefon, bisiklet monitörü) iletişim kurmak için Bluetooth ve ANT+ protokollerini kullanır. Genellikle telefon, tablet veya saatler ile kullanılan bu kemer, çalışmamızda ESP32 ile BLE üzerinden kolaylıkla haberleşmiştir.



Şekil 6. Uygulamada kullanılan KAH monitörü

Figure 6. KAH monitor used in practice

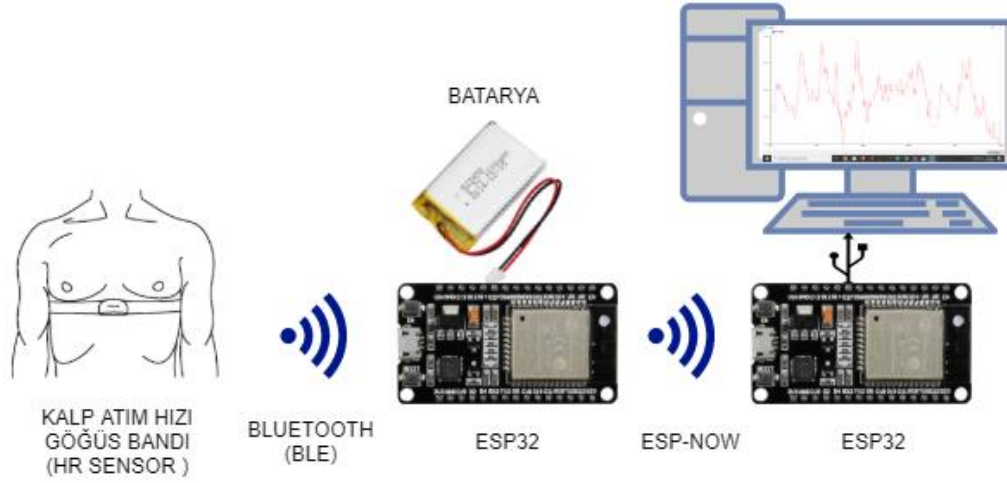
UYGULAMA (APPLICATION)

Spor biliminde performansa ve sağlığa dayalı pek çok veri ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Tüm bireysel ve takım sporlarında ortak, birçok durumla doğrudan veya dolaylı ilişkili parametre olan Kalp Atım Hızı bilgisi çeşitli yöntemlerle ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Bu çalışmada bu önemli bilgiyi ESP-NOW aracılığıyla iletecek bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistemi donanım ve yazılım tasarımı olarak ikiye ayırabiliriz.

Donanım Tasarımı (Hardware Design)

ESP-NOW'ın gereksinimlerinin az olması sayesinde donanım tasarımı; iki adet ESP32 modülü, KAH göğüs bandı ve bir adet Li-Po batarya ile gerçekleştirilmiştir.

- Kişi üzerindeki giyilebilir şekilde tasarlanan sistemde, göğüs bandı tarafından algılanan KAH bilgisi, BLE aracılığıyla sporcunun üzerinde bulunan ESP32 modülüne aktarılır.
- Kişi üzerindeki ESP32 modülüne aktarılan KAH bilgisi, ESP-NOW protokolü ile kablosuz olarak uzak mesafedeki diğer ESP32 modülüne iletilir.
- Alınan veriler seri port aracılığıyla ekrana yansıtılır ve uzaktan KAH bilgisi kontrol edilebilir.

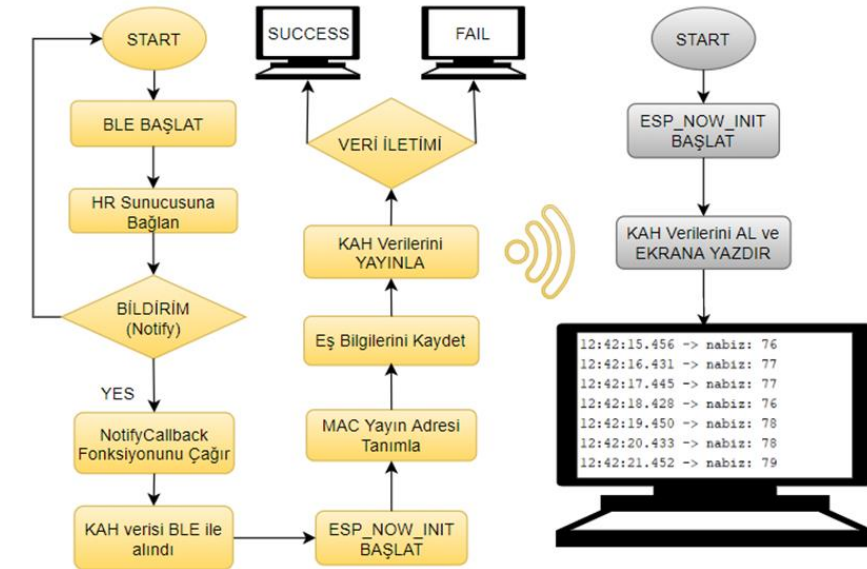


Şekil 7. Donanım tasarımı

Figure 7. Hardware design

Yazılım Tasarımı (Software Design)

ESP32 mikro denetleyicisi genel yazılımı, Arduino IDE üzerinden oluşturulan ve geliştirilen kodlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Birinci ESP32 modülü (verici) KAH verisini alacak ve diğer uzak mesafedeki modüle bunu iletacaktır. İkinci ESP32 modülü (alıcı) ise bu veriyi alıp monitöre yansıtacaktır.



Şekil 8. Yazılım tasarımı

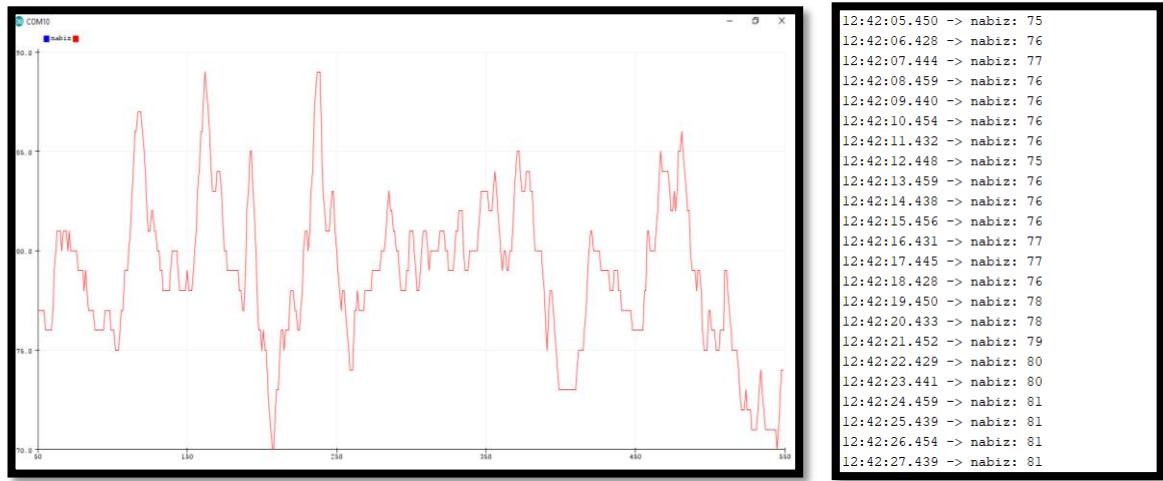
Figure 8. Software design

Şekil 8'de gösterilen akış diyagramının sol bölümü sporcunun üzerinde giyilebilir olan ESP32 (verici) için geliştirilen kodu, sağ bölümü ise kullanıcı takibi için verileri alan ESP32 (alıcı) için geliştirilen kodu temsil etmektedir. Sistem kapsamında geliştirilen çeşitli kontrol mekanizmaları ile iletişim sürekli kontrol edilir. Birinci kontrol mekanizması, BLE için göğüs kemerinden bir veri akış bildiriminin olup olmadığını kontrol eder. Bu da bize bildirim geldiği sürece KAH bilgisinin sporcu üzerindeki ESP32 modülüne aktarımını sağlar. Kodlar yardımıyla geliştirilen bu mekanizma enerji tasarrufu açısından önemlidir. Daha sonra ESP-NOW iletişim protokolü başlatılır. Uzak mesafede antrenör kontrolünde bulunan ESP32 (alıcı) modülüne özgü bir MAC adresi tanımlanır ve KAH verileri bildirim geldiği sürece iletir. İkinci kontrol

mekanizması ise iletimin veya bir başka deyişle yayının başarılı olup olmadığı konusunda kullanıcıyı bilgilendirmek üzere ayarlanır. Alıcı ESP32 modülü bu KAH verilerini alır ve bir monitöre yansıtır. Arduino IDE üzerinden geliştirilen kodlar yardımıyla BLE ve ESP-NOW iletişimi saniyede bir veri alacak şekilde tasarlanmıştır.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Çalışma sonucunda ESP-NOW ile hızlı, ek gereksinimlere (modem, harici anten, ESP32 harici ek mikrodenetleyici gibi) ihtiyaç duyulmadan ve güvenli bir şekilde kişinin KAH verisi uzak mesafedeki alıcıya aktarılmıştır. Saniyede bir veri alışverişi olacak şekilde, yaklaşık olarak 155 metre mesafede sağlıklı bir iletişim gerçekleştirilmiştir. Şekil 9’da KAH verilerinin ESP-NOW ile aktarımı sonucu oluşan grafik ve numerik değerler gösterilmiştir. Bu sistem ile sporcudan alınan veriler belli bir mesafede bulunan antrenör monitörüne aktarılabilir ve arayüz yardımıyla gerçek zamanlı takibi yapılabilecektir.



Şekil 9. Örnek uygulama için KAH monitörü görünümü

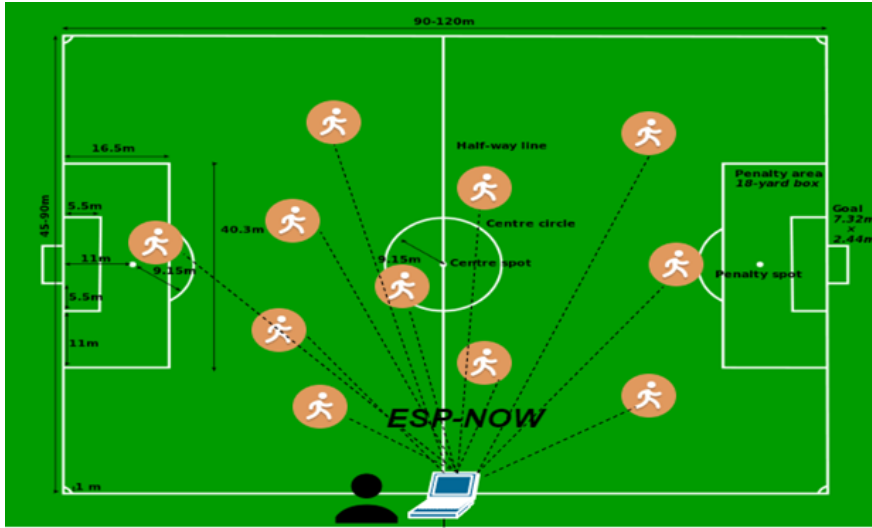
Figure 9. View of the KAH monitor for sample application

Bu uygulama bize ESP-NOW protokolü ile herhangi bir sensör verisinin (bu çalışma için KAH verisi), 250 baytı geçmediği sürece 20 cihaza kadar her türlü iletişiminin (tek yönlü, çift yönlü ve ağ yapısı) kolayca gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Bir kişi için yapılan bu çalışma takım sporlarına da uyarlanabilir ve geliştirilebilir. Örneğin bir hentbol, basketbol ya da futbol takımının fiziksel performans (hız, mesafe, sıçrama, sprint gibi) verileri veya KAH, maksimum oksijen miktarı gibi iç yüklenme verileri tek bir ESP kullanılarak ESP-NOW ile anlık toplanabilir ve takip edilebilir. Bir futbol takımı için bu sistem kullanılarak futbolcuların üzerinde bulunan ve sensör bilgilerini (KAH gibi) içeren ESP modülü (verici) ile, ESP-NOW aracılığıyla kenarda bulunan antrenörünün anlık takip edebileceği bir ESP modülüne (alıcı) veri gönderilebilir. Bir futbol sahasının boyutları Şekil 11’de gösterilmektedir. ESP-NOW sayesinde tüm futbolculardan alınan veriler bu mesafeler içerisinde, maliyet ve boyut olarak ciddi avantajlar sunmuş olacaktır. Sadece bir ESP32 ile tüm sporcuların aynı anda gerçek zamanlı kontrolü bu sistem ile gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca ESP-NOW ile cihaza özgü veri aktarımı yapılabilmektedir. Bu sayede bu verileri alan ve monitöre aktaran ESP32 (alıcı), verilerin hangi cihazdan (verici ESP32) yani hangi sporcudan geldiğini tanıyabilecek ve sınıflandırabilecektir. Bu da ESP-NOW protokolünün bu tür uygulamalar için bir başka avantajını ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Mesafe testi sonucu

Figure 10. Distance test result



Şekil 11. ESP-NOW iletişim protokolünün futbol antrenmanlarına uygulanması

Figure 11. Application of ESP-NOW communication protocol to football training

Bu çalışmada oluşturulan sistem ile KAH monitörlerinin kısa mesafede (Bluetooth/ANT+), saat benzeri aparatlarla takip edilmesinden kaynaklı oluşan sorunlar giderilmiştir. Bunlardan birisi, egzersiz sırasındaki anlık KAH bilgisini takip edebilmektir. Bunun için antrenörün, sporcunun bileğindeki saate bakıp not etmesi gerekir, bu da antrenmanların sık sık bölünmesi anlamına gelmektedir. Bunu yapmak istemeyen antrenörler ise gerçek zamanlı takip yerine antrenman sonrası kaydedilmiş verileri kontrol edebilmektedir. Bu da gerçek zamanlı takipte fark edilebilecek ayrıntıları kaçırmayı ve anlık önlemler almayı engelleyecektir. Bu çalışmada kullanılan ESP-NOW protokolü ile sporcu üzerindeki kemerden alınan KAH verileri uzak mesafede bulunan antrenör ekranına aktarılabilmiştir. Bu sayede kesintisiz, gerçek zamanlı takip yapılabilmiştir.

Kesintisiz gerçek zamanlı takip, kablosuz haberleşme protokolü olan ESP-NOW ile gerçekleştirilmiştir. ESP32 modülünün sahip olduğu özellikler ve barındırdığı ESP-NOW protokolü bu çalışma için çok önemli avantajlar sunmuştur. Oluşturulan sistemde ilk aşama, EKG tabanlı göğüs kemerinden KAH verilerinin alınmasıdır. Kemer daha önce de belirtildiği gibi Bluetooth ve ANT+ iletişimini desteklemektedir. Daha sonraki aşama ise alınan verilerin anlık olarak uzak mesafedeki

antrenöre aktarılmasıdır. Sporcunun üzerinde bulunan kemerden bu verileri almak ve uzak mesafede yer alan antrenöre anlık veri aktarımını sağlamak için çeşitli yöntemler kullanılabilir.

Bunlardan birisi Bluetooth modülü, Arduino denetleyici ve uzak mesafe iletimi için RF, ZigBee, Wi-Fi haberleşme modüllerinden birini kullanmak olabilir. Böylelikle KAH verileri kemerden sporcunun üzerinde bulunacak Bluetooth modülü yardımıyla alınabilir ve yine sporcunun üzerinde bulunacak denetleyiciye aktarılabilir. İkinci aşamada ise denetleyici üzerinden RF, ZigBee veya Wi-Fi ile antrenöre bu veriler aktarılabilir. Böyle oluşturulacak bir sistemde sporcu üzerinde hem Bluetooth modülü hem denetleyici hem de uzak mesafe haberleşme modülü bulunacaktır. Bu da giyilebilir tasarım açısından ve maliyet anlamında kötü bir seçim demektir. Ayrıca uzaktan haberleşmek için Wi-Fi modülü kullandığımızı düşünelim. Daha önce bahsettiğimiz dezavantajlarından ve gereksinimlerinin (modem gibi) fazla olmasından dolayı Wi-Fi'yi tercih etmek, bu sistem özelinde doğru olmayacaktır. Zigbee, belirli cihazların birbirleriyle iletişim kurmasına izin vermek için düşük enerjili radyo dalgalarını kullanan bir kablosuz iletişim protokolüdür. ZigBee kullandığımızda ise gereksinimlerin daha az olduğu ve düşük güç tüketiminin olduğu bir gerçektir. Ancak maliyet açısından ZigBee modüller de bu sistem için oldukça pahalıdır (~300 TL) (<https://www.robishop.com/urun/xbee-wifi-modul-2-4-ghz-802-11b>). Ayrıca RF kablosuz haberleşme modülü kullandığımızda ise belki ZigBee'ye göre daha ucuz bir sistem oluşturabilir ancak hem gereksinimler (denetleyici gibi) hem de güç tüketimi artar.

Bir başka yöntem olarak bu çalışmada olduğu gibi ESP32 denetleyici kullanılabilir. Böylelikle KAH verileri kemerden sporcunun üzerinde bulunacak ESP32 ile dahili Bluetooth/BLE üzerinden aktarılabilir. İkinci aşamada ise yine aynı ESP32 modülü üzerinden ESP-NOW ile antrenöre bu veriler aktarılabilir. Böyle oluşturulacak bir sistemde, sporcu üzerinde sadece tek bir ESP32 modülü bulunacak demektir. Çalışmada kullandığımız bu yöntemle, yukarda bahsedilenlere göre hem donanımsal anlamda gereksinimler azaltılmış hem de maliyet (tek bir ESP32 maliyeti ~50 TL) düşürülmüştür. (<https://urun.n11.com/arduino-urunleri-ve-setleri/arduino-esp-32s-wifi-ve-bluetooth-modul-P463912428>). Sadece sporcunun üzerinde bulunacak tek bir ESP32 ile yukardaki yöntemde kullanılacak modüllerin ve denetleyicilerin yaptığı işlerin tamamı yapılabilmektedir. Sonuç olarak KAH göğüs kemerinden tek bir ESP32 ile BLE üzerinden alınıp, aynı ESP32 üzerinden antrenöre ESP-NOW aracılığı ile gönderilebilmiştir. Böylelikle antrenör bilgisayar ekranından oyuncu verilerini gerçek zamanlı takip edebilmektedir.

Çizelge 3. Uygulamada kullanılan ESP32 (ESP-NOW) modülü ile bazı haberleşme araçlarının karşılaştırması

Table 3. Comparison of ESP32 (ESP-NOW) module used in the application and other communication tools

Özellik	ESP32	ZigBee	HC12
Frekans aralığı	2.4 GHz	2.4 GHz	433 MHz
Çevresel arayüzler	GPIO, ADC, DAC, SPI, I2C, I2S, UART, SDIO, CAN, Kızılötesi, Ethernet, PWM, Dokunma (touch) sensörü, sıcaklık sensörü, manyetik alan (hall) sensörü	I ² C, SPI, UART	UART
Kablosuz Haberleşme Opsiyonları	RF Bluetooth V4.2 - BLE Wi-Fi ESP-NOW	RF	RF
Veri Hızı	150 Mbps BLE = 1 Mbps ESP-NOW = 1 Mbps	250 kbps	Varsayılan baud hızı 9600 bps
Güç Tüketimi	Ultra Düşük	Ultra Düşük	Yüksek
Menzil	Bluetooth/ BLE = Kısa ESP-NOW = Orta / Uzun	Uzun	Orta - Uzun
Maliyet	Düşük (~50 TL)	Yüksek (~300 TL)	Orta (~80 TL)
Ek Gereksinim	Yok	KAH verilerini alabilmek için Bluetooth Modülü ve/veya denetleyici gerektirir.	İletişim için Mikrokontrolcü gerektirir. KAH verilerini alabilmek için de Bluetooth Modülü ve/veya denetleyici gerektirir.

Yukardaki tabloda bu uygulamada kullanılan ESP32 modülü (ESP-NOW) ile düşük güç tüketimi gerektiren, büyük veri aktarım hızları gerektirmeyen uygulamalar için tasarlanan ZigBee ve seri RF haberleşme modüllerinden biri olan HC12 modülleri karşılaştırılmıştır. Bu tür uygulamalar için, tümleşik yapısıyla ESP32'nin avantajları açıkça görülmektedir. Bunlardan birisi, üzerinde çeşitli kablosuz haberleşme opsiyonlarını üzerinde barındırmasıdır. Bu sayede başka bir modüle gerek duymadan verileri sensörlerden alıp kolayca aktarabilmektedir. Ek gereksinimlere ihtiyaç duymaması ESP32 ve ESP-NOW protokolünü diğer modüllerden ve protokollerden ayıran en önemli özelliktir. ZigBee de veri gönderimi için ekstra gereksinime ihtiyaç duymaz ancak bu uygulamada olduğu gibi sensörden verileri almak için diğer haberleşme yöntemlerini (BLE gibi) de kullanmayı gerektirebilir. Bu uygulama için oluşturulan sistem ve ZigBee ile oluşturulabilecek sistemin maliyeti arasında çok büyük farklar vardır. Oluşturulan

sistemde alıcı ve verici olacak şekilde iki adet ESP32 kullanılmıştır. Bunların toplam maliyeti yaklaşık 100 TL'dir. Oluşturulan sistemde bütün işi bu iki ESP32 modülü yapabilmektedir. ZigBee ile oluşturulacak sistemde yine iki adet ZigBee modülü kullanılacaktır. Bunun dışında göğüs kemerinden veri alınması ve sporcunun üzerindeki modüle aktarılması için de Bluetooth modülü ve denetleyici kullanılacaktır. ZigBee ile oluşturulacak sistemin toplam maliyeti de yaklaşık olarak 700 TL'yi bulmaktadır. Bu da oluşturulan sistemin maliyet açısından avantajlı olduğunu açıkça göstermektedir.

Gerçekleştirilen uygulama sonucunda sporcudan alınan KAH verileri ortalama 155 metre uzaklıktaki monitör tarafından kontrol edilebilmekte, anlık olarak takibi sağlanabilmektedir. Bu mesafeden sonra da KAH verileri alınabilmiş (250 metreye kadar) ancak veri iletiminde rastlanan küçük kesintilerden ötürü hesaba katılmamıştır. İletim hızı ve frekansı daha düşük bir veri iletiminde bu mesafe daha da arttırılabilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan geliştirme kartı olan ESP32, nesnelerin interneti olarak adlandırılan IoT uygulamalar için oldukça elverişlidir. ESP-NOW protokolünü destekleyen bu kart sayesinde herhangi ekstra mikrodenetleyici, anten, yönlendirici kullanılmadan doğrudan diğer kartlarla haberleşebilmektedir. Bu da literatür açısından giyilebilir, taşınabilir teknoloji geliştirme çalışmalarında bu yöntemin kullanışlı olduğunu bize göstermektedir. Kibrit kutusundan daha küçük boyutlarda giyilebilir olarak tasarlanan sistem özellikle spor uygulamalarında ve IoT cihazlarla kullanılmaya oldukça elverişlidir. Benzer şekilde ESP-NOW protokolü ile IoT uygulamalarında giyilebilir cihazların iletişimi, sensör ve kısa paket iletim uygulamaları, ev otomasyon sistemleri, sağlık ve spor uygulamaları tasarlanabilir ve geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2019- 12274 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Achten, J., Jeukendrup, A.E., 2003, "Heart rate monitoring: applications and limitations", *Sports Medicine*, 33(7), 517-538. Doi: 10.2165/00007256-200333070-00004.
- Almeida, M., Bottino, A., Ramos, P., Araujo C.G., 2019, "Measuring heart rate during exercise: from artery palpation to monitors and apps" *International Journal of Cardiovascular Sciences*, 32(4), 396-407. Doi: 10.5935/2359-4802.2019006.
- Bizati, Ö., 2013, *Profesyonel futbolcuların fiziksel ve fizyolojik değerlendirmelerinde kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Borresen, J., Lambert, M.I., 2008, "Quantifying training load: a comparison of subjective and objective methods" *International journal sports physiology performance*, 3, 16-30. Doi: 10.1123/ijsp.3.1.16.
- Dündar, Ö.M., 2020, *Sporcunun Kalp Atım Hızının Ölçülmesi ve Küresel Konum Belirleme (GPS) Sistemi ile Hız Performansının Gerçek Zamanlı Tespiti*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- ESP-NOW, ESP-IDF Programming Guide v4.0-dev-1191, pp. 2-4, 2019.
- Gillinov, S., Etiwy, M., Wang, R., Blackburn, G., Phelan, D., Gillinov, M., Houghtaling, P., Javadikasgarı, H., Desai, MY, 2017, "Variable Accuracy of Wearable Heart Rate Monitors during Aerobic Exercise" *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 49, No. 8, pp. 1697-1703.
- Hettiarachchi, I.T., Hanoun, S., Nahavandi, D., Nahavandi, S., 2019, "Validation of Polar OH1 optical heart rate sensor for moderate and high intensity physical activities" *Plos one*, 14(5), 1-13. Doi: 10.1371/journal.pone.0217288.
- Hoang, T.N., Van, S.T., Nguyen, B.D., 2019, "ESP-NOW based decentralized low cost voice communication systems for buildings" *International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, Vietnam, 108-112. Doi: 10.1109/ISEE2.2019.8921062.

- Hopkins, W.G., 1991, "Quantification of training in competitive sports, Methods and applications" *Sports Medicine*, 12, 161–183, Doi: 10.2165/00007256-199112030-00003.
- Khanchuea, K., Siripokarpirom, R., 2019, "A Multi-Protocol IoT Gateway and WiFi/BLE Sensor Nodes for Smart Home and Building Automation: Design and Implementation", *10th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*, 1–6.
- Laukkanen, R., Virtanen, P.K., 2011, "Heart rate monitors: State of the art", *Journal of Sports Sciences*, Doi: 10.1080/026404198366920.
- Sartor, F., Gelissen, J., Dinther, R.V., Roovers, D., Papini, G.B., Coppola, G., 2018, "Wristworn optical and chest strap heart rate comparison in a heterogeneous sample of healthy individuals and in coronary artery disease patients", *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 10, 10.
- Spierer, D.K., Rosen, Z., Litman, L.L., Fujii, K., 2015, "Validation of photoplethysmography as a method to detect heart rate during rest and exercise", *Journal of Medical Engineering & Technology*, 39(5), 264-271. Doi: 10.3109/03091902.2015.1047536.
- Wang, R., Blackburn, G., Desai, M., Phelan, D., Gillinov, L., Houghtaling, P., Gillinov, M., 2017, "Accuracy of Wrist-Worn Heart Rate Monitors", *JAMA Cardiology*, 2(1), 104. Doi:10.1001/jamacardio.2016.3340.
- Yukhimets, D., Sych, A., Sakhnenko, A., 2020, "Designing a Method for Constructing Distributed Open ACS Based on the ESP-NOW Wireless Protocol", 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, pp. 642-647, Doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208135.



TRİLATERAL ÇEVİRİM-ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİM (TLÇ-ORÇ) VE ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİM-ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİM (ORÇ-ORÇ) BİRLEŞİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

¹Nagihan BİLİR SAĞ , ²Mehmet ÖZÇELİK 

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya, TÜRKİYE

²Van Yüzyüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Van, TÜRKİYE

¹nbilir@ktun.edu.tr, ²mehmetozcelik@yyu.edu.tr

(Geliş/Received: 22.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.05.2021)

ÖZ: Yenilenebilir enerji kaynaklarının ısı enerjisini veya atık ısı enerjisini kullanarak güç üretmek için en yaygın kullanılanlardan biri Organik Rankine çevrimidir. Trilateral Çevrim ise Organik Rankine çevriminden türbin elemanı yerine genleştirici kullanılması yönüyle ayrılır. Bu çalışmada, Trilateral çevrim - Organik Rankine çevrim ve Organik Rankine çevrim - Organik Rankine çevrim birleşik güç sistemlerinin yapıları incelenerek Engineering Equation Solver (EES) programı yardımı ile termodinamik analizleri yapıldı. Her bir birleşik güç sistem için jeotermal kaynağın ve alt çevrim evaporatörünün farklı sıcaklık değerlerinde sistem performansını maksimum yapan akışkan çiftleri belirlendi ve bu belirlenen akışkan çiftleri kullanan birleşik güç sistemlerinin sonuçları karşılaştırıldı. Araştırma sonuçlarına göre, her bir çalışma şartı için ısı verimi ve/veya sistemden elde edilen net gücü maksimum yapan akışkan çiftleri olduğu tespit edildi. Jeotermal kaynağın 100-280 °C sıcaklıklarında birleşik güç sisteminin net gücünü maksimum yapan alt çevrim evaporatör sıcaklığının olduğu tespit edildi. Çalışma şartlarına bağlı olarak ORÇ-ORÇ'nin net güç çıktısının TLÇ-ORÇ'ye göre % 23,5'e kadar daha yüksek olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Birleşik güç sistemleri, Jeotermal Enerji, Organik akışkan, Organik Rankine çevrimi, Trilateral çevrim

Comparative Performance Analysis of Combined Power Systems Trilateral Cycle-Organic Rankine Cycle (TLC-ORC) and Organic Rankine Cycle Organic Rankine Cycle (ORC-ORC)

ABSTRACT: One of the most widely used to generate power using heat energy or waste heat energy from renewable energy sources is the Organic Rankine cycle. The Trilateral Cycle differs from the Organic Rankine cycle in that it uses an expander instead of a turbine element. In this study, the structures of Trilateral cycle - Organic Rankine cycle and Organic Rankine cycle - Organic Rankine cycle combined power systems were examined and thermodynamic analyzes were made with the help of Engineering Equation Solver (EES) program. For each combined power system, the fluid pairs that maximize the system performance at different temperatures of the geothermal source and sub-cycle evaporator were determined and the results of the combined power systems using these determined fluid pairs were compared. According to the results of the research, it was determined that there are pairs of fluids that maximize the thermal efficiency and / or the net power obtained from the system for each operating condition. It was determined that at temperatures of 100-280 °C of the geothermal resource, the combined power system was evaporating hot, which maximized the net power. Depending on the working conditions, it was determined that the net power output of ORC-ORC was up to until 23.5 % higher than TLC-ORC.

Key Words: Combined power systems, Geothermal Energy, Organic fluid, Organic Rankine cycle, Trilateral cycle

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek sıcaklığa sahip ısı kaynaklarından güç üretiminde birçok yöntem kullanılır. Rankine Çevrimi de güç üretimi için tercih edilen yöntemler arasındadır. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve Trilateral Çevrimlerinde (TLÇ) ise çalışma akışkanı olarak kullanılan organik akışkanların sahip olduğu termodinamik özellikler sayesinde düşük ve orta sıcaklığa sahip ısı kaynaklarından güç üretimi sağlanmaktadır. ORÇ ve TLÇ, Rankine Çevrimi ile aynı elemanlara sahiptirler. Fakat TLÇ’de türbin elemanı yerine genleştirici kullanılır.

Açık literatürde ORÇ-ORÇ ile ilgili çalışmalar yer alırken TLÇ-ORÇ ile ilgili oldukça az çalışma olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Literatürdeki bazı çalışmaların sonuçları

Table 1. Results of some studies in the literature

Kaynak	Isı Kaynağı Sıcaklık Aralığı (°C)	T _{EV,1} (K)	T _{EV,2} (K)	TLÇ-ORÇ			ORÇ-ORÇ		
				W _{net} (kW)	η _{b,th} (%)	η _{b,ek} (%)	W _{net} (kW)	η _{b,th} (%)	η _{b,ek} (%)
Yu ve diğ. (2018)	-	470	343	11.8	25	65,6	8.8	18,7	50
Li ve diğ. (2019)	-	530	373	11.3	24,2	63,2	W _{net} 'teki maksimum % artış	η _{b,ek} 'teki maksimum % artış	
Braimakis ve Karellas (2018)	100-300	-	-	-	-	-	25	25	

TLÇ-ORÇ birleşik güç sistem ile ilgili çalışmalara bakıldığında bir çalışmada Yu ve diğ. (2018) ORÇ-ORÇ sisteminin üst çevrim için ORÇ yerine TLÇ önermişlerdir. ORÇ-ORÇ ile TLÇ-ORÇ sistemlerini termodinamiğin birinci ve ikinci yasa analizlerini kullanarak karşılaştırmışlardır. Her iki sıcaklık çevrimlerinin evaporatör sıcaklığının; alt ve üst çevrimler üzerindeki etkilerini farklı çalışma akışkanları için ayrı ayrı incelemişlerdir. T_{EV,1} = 470 K ve T_{EV,2} = 343 K sıcaklık şartlarında TLÇ-ORÇ sistemi kullanıldığında ORÇ-ORÇ sistemine kıyasla maksimum değerler sırasıyla % 34,1, % 33,7 ve % 31,2 daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışma sıcaklıkları için TLÇ-ORÇ sistemi ile çalışılması daha uygun olacaktır.

Li ve diğ. (2019) atık ısı kaynağı ve çalışma akışkanı arasında daha iyi bir ısıl uyum elde etmek için TLÇ-ORÇ birleşik güç sistemini kullanmışlardır. Üst çevrim olan TLÇ için Sikloheksan, Toluen, Benzen ve su akışkanlarını; alt çevrim olan ORÇ de ise R245fa soğutucu akışkanını çalışma akışkanı olarak seçmişlerdir. TLÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin termodinamik analizini sonucu maksimum sistem performansı TLÇ’de çalışma akışkanı olarak Toluen kullanılması durumunda elde edilmiştir. Evaporatör sıcaklıkları arttıkça sistemin net güç çıkışının, ısıl veriminin ve ekserji veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Üst çevrim evaporatör sıcaklığı 530 K ve alt çevrim evaporatör sıcaklığı 373 K için TLÇ’de akışkan olarak Toluen kullanılması durumunda birleşik sistemin maksimum net güç çıkış, ısıl verim ve ekserji verim değerlerinin sırasıyla 11.3 kW, % 24,2 ve % 63,2 olarak bulmuşlardır.

Wang ve diğ. (2014) genleştirici izentropik veriminin, üst çevrimin buharlaşma basıncının ve alt çevrimin yoğuşma sıcaklığının ORÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Song ve Gu (2015) ORÇ-ORÇ birleşik güç sistem ile egzoz atık ısısından ve motor ceket suyu atık ısısından elektrik üretimini ve üst çevrimin atık ısısının da üst çevrim kondenserini alt çevrimin evaporatörü olarak kullanıp geri kazanımını hedeflemiştir. Simülasyon sonuçları üst çevriminin farklı yoğunlaşma koşulları altında, alt çevriminin pinch point (sıkıştırma) noktasının

belirdiğini ortaya çıkarın farklı yerlerde, farklı buharlaşma sıcaklıklarına ve diğer termal parametrelere neden olur. Üst çevrim için sikloheksan ve alt çevrim için R245fa ile çalışıldığında, birleşik güç sistem, 111.2 kW maksimum güç çıkışına ulaşır ve motorun orijinal güç çıkışı 996 kW olduğundan, sistem tarafından üretilen ek güç, motor gücünü % 11,2 oranında artırabileceği sonucuna varmışlardır.

Apostol ve diğ. (2014) ORÇ, ön ısıtmalı ORÇ, rejeneratif ORÇ, ORÇ-rejeneratif ORÇ, ORÇ-ORÇ ve ön ısıtmalı ORÇ-rejeneratif ORÇ sistemleri arasından motor jeneratörün baca gazı atık ısı ve motor soğutma suyu atık ısısının geri kazanımını sağlarken aynı zamanda maksimum güç çıkışı elde edilen çevrimi seçmeyi amaçlamışlardır. Akışkan analizi ile de en iyi güç çıkış değerlerine ulaşılan çalışma akışkanını bulmaya çalışmışlardır. Yapılan termodinamik analiz sonuçlarına göre farklı kimyasal sınıftan on çalışma akışkanı için en iyi konfigürasyonun ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemi ve en iyi akışkanın da R1336mzz akışkanı olduğunu bulmuşlardır.

Yang ve diğ. (2017a) altı silindri bir CNG (sıkıştırılmış doğal gaz) motorun egzoz atık ısısını, soğutma sisteminden gelen atık ısıyı ve iç soğutucu atık ısısını geri kazanmak amacıyla ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemi için termodinamik, ısı transferi ve optimizasyon modelleri oluşturmuştur. CNG motorunun tüm çalışma aralığı boyunca atık ısı karakteristiklerine uygun olarak net güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak ve ısı transfer alanını en aza indirmek amacıyla termodinamik ve ısı transfer performansları bir GA (genetik algoritma) kullanılarak Pareto yöntemiyle hesaplanmış ve sistemin optimum çalışma aralığını belirlemişlerdir. Analizde ayrıca üst çevrimin optimum buharlaşma basıncı ve aşırı ısınma derecesinin CNG motorunun çalışma koşullarından etkilendiği sonucuna varmışlardır. Yang ve diğ. (2017b) ayrıca başka bir çalışmalarında ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemlerinin termo - ekonomik optimizasyon ve analizini çalışmışlardır.

Braimakis ve Karellas (2018) atık ısı geri kazanımı için ORÇ-ORÇ'nin ekserji optimizasyonunu yapmışlardır. Optimizasyon değişkenleri olarak üst ve alt çevrimlerin evaporatör basınçları ile üst çevrimdeki buharlaştırıcı minimum sıcaklık farkı ve kondenser sıcaklığı seçilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında tek kademeli ORÇ ile karşılaştırıldığında ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemlerinin ekserji verimini iyileştirme potansiyelini araştırmayı ve 100 - 300 °C arasındaki ısı kaynağı sıcaklıkları için net güç çıkışlarını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamışlardır. ORÇ-ORÇ ile elde edilen sonuçlar tek kademeli döngülerle karşılaştırılmış, bu çalışma sıcaklıkları için ORÇ-ORÇ'lerde tek kademeli ORÇ'lere kıyasla değişen ısı kaynağı sıcaklıkları için güç çıkışı ve ekserjetik verimliliğin göreceli olarak % 25'e kadar artabileceği sonucuna varmışlardır.

Lu ve diğ. (2018), jeotermal sistemlerde tek flaş sistemi, çift flaş sistemi, flaş-ORÇ sistemi ve çift flaş-ORÇ sistemi olmak üzere dört güç üretim sisteminin hem termodinamik hem de tekno-ekonomik analizini yapmışlardır. Termodinamik analizde sistemlerin net güç çıkışını % 20 oranında artırmak amacıyla, sistemler arasında yapılan karşılaştırmalar ile optimizasyon yapılmıştır. R123, R152a, izobütan, n-pentan ve R245fa çalışma akışkanları her bir sistemde çalıştırılmış ve farklı jeotermal akışkan koşulları altında optimum jeotermal enerji çevrimlerinin seçilmesi amaçlanmıştır. Tekno-ekonomik analizde ise elektrik seviye maliyeti ve geri ödeme süresi değerlendirilmiştir.

Mohammadkhani ve Yari (2019) dört zamanlı turboşarjlı dizel motor için sıfır boyutlu bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Motorun hem egzoz atık ısı hem de soğutma suyunun atık ısısından yararlanmak amacıyla transkritik bir ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemi kullanmışlardır. Üst ve alt çevrimlerde sırasıyla Toluen ve R143a çalışma akışkanları kullanıldığında en iyi termodinamik sonuçların elde edildiğini görmüşlerdir.

Bu çalışmada TLÇ ve ORÇ'nin kullanıldığı iki birleşik güç sistemde yeni nesil organik akışkanlar kullanılarak karşılaştırmalı enerji analizi yapılmıştır. Termodinamiğin birinci yasasını kullanarak EES programı yardımı ile birleşik güç sistemlerinin enerji analizi yapılmıştır.

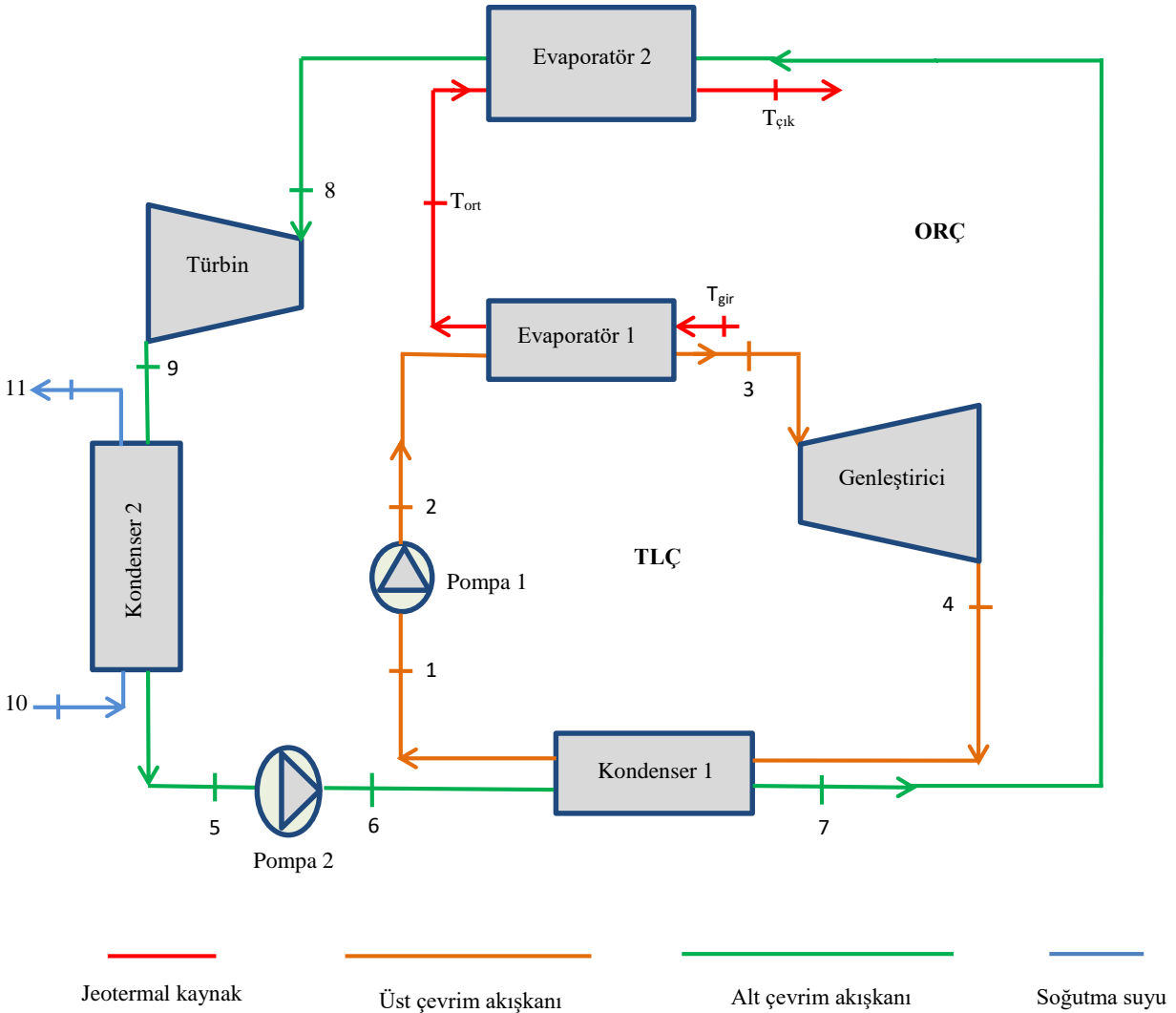
Literatürde ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemleriyle ilgili çalışmaların yapılmış olduğu buna karşın TLÇ-ORÇ'yi konu alan çalışmaların yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Bu nedenle ORÇ ve TLÇ'nin kullanıldığı birleşik güç çevrimlerinin karşılaştırmalı termodinamik analiz sonuçları literatüre önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

Ayrıca yeni nesil organik akışkanlar kullanarak hem jeotermal kaynağın farklı sıcaklıkları için hem

de alt çevrimin farklı evaporatör sıcaklıkları için hangi akışkan çiftinin birleşik güç sisteminin performansını maksimum yaptığının belirlenmesi de bu çalışmayı ön plana çıkarmaktadır.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Trilateral Çevrim – Organik Rankine Çevrim Birleşik Güç Sistemi (TLÇ-ORÇ) (Trilateral Cycle – Organic Rankine Cycle Combined Power System (TLC-ORC))

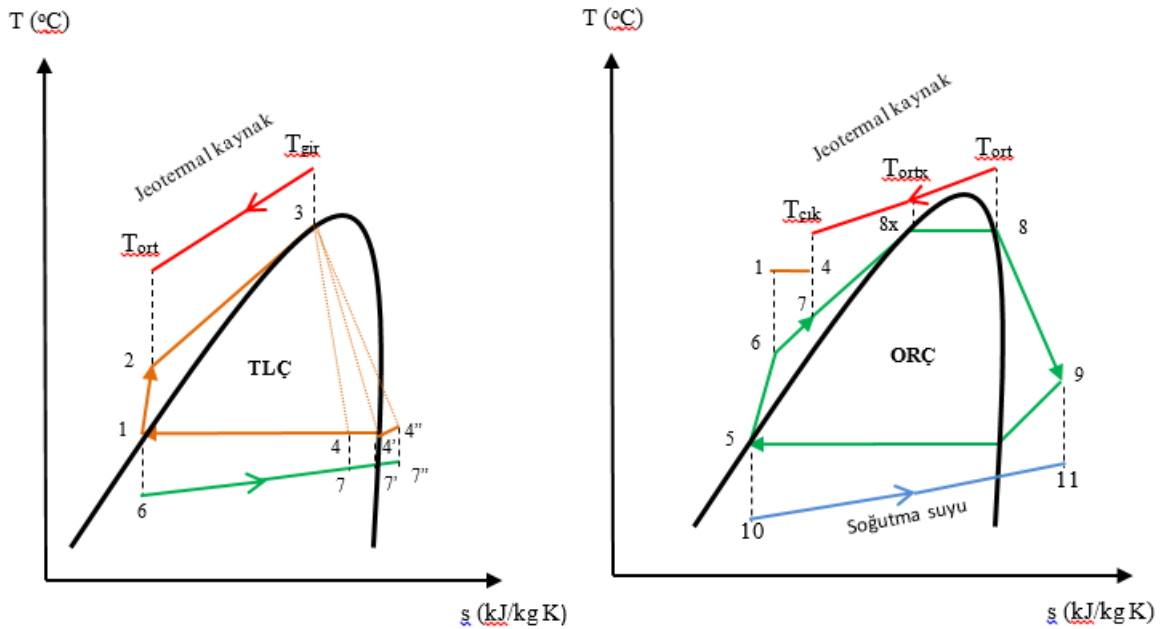


Şekil 1. TLÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin tesisat şeması

Figure 1. Installation diagram of TLC-ORC combined power system

TLÇ-ORÇ birleşik güç sisteminde üst çevrim TLÇ, alt çevrim ise ORÇ'dir. TLÇ ve ORÇ çalışma prensibi olarak Rankine çevrimine oldukça benzerler. Ayırt edici en önemli fark, çalışma akışkanı olarak organik akışkan kullanılmasıdır. Organik akışkanlar, suya ve inorganik akışkanlara göre kritik sıcaklık ve kritik basınç değerleri daha düşük, moleküler ağırlığı ise daha yüksektir. Bu da organik akışkanların ısı enerjisini daha çabuk bünyesine alarak çabuk buharlaşmasını ve çok düşük sıcaklıklı enerji kaynaklarından yararlanmaya imkan sağlar. Aynı zamanda organik akışkanlar çalışma akışkanı olarak sistemde çalışırken sistem elemanlarının korozyona uğrama ihtimali düşer ve sistem ömrü uzar. İnorganik akışkanlar, organik akışkanlara kıyasla düşük kütle akış oranına ve küçük ısı girdisine sahiptir. ORÇ'lerde organik akışkanlar kullanıldığı için çevrimin temiz ve daha verimli çalışması beklenmektedir.

TLÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin çalışma prensibi: Çalışma akışkanı üst çevrimin (TLÇ) pompasına 1 durumunda doymuş sıvı olarak girer ve 2 durumunda pompayı terk eder. 2 durumunda sıkıştırılmış sıvı fazında evaporatör 1'e girer ve burada jeotermal kaynaktan ısı enerjisini çekerek doymuş sıvı durumuna gelir ve evaporatörden çıkar. 3 durumunda genleştiriciye giren akışkan çalışma şartlarına bağlı olarak 4 durumunda sıvı-buhar karışımı, doymuş buhar ya da kızgın buhar olarak genleştiriciyi terk eder. 4 durumunda kondenser 1'e giren akışkan alt çevrimdeki akışkana ısıyı vererek yoğunlaşır ve 1 durumunda doymuş sıvı olarak tekrar pompaya girer ve bu çevrim bu şekilde devam eder. Alt çevrimde (ORÇ) ise çalışma akışkanı 5 durumunda pompa 2'ye doymuş sıvı olarak girer ve 6 durumunda pompayı terk eder. 6 durumunda ORÇ için ön ısıtıcı kabul edilen elemana girerek üst çevrimin atık ısısını (kondenser 1'in attığı ısı) alır ve 7 durumunda evaporatör 2'ye girer. Evaporatör 2'de akışkan TLÇ çevriminde T_{ort} sıcaklığında çıkan jeotermal enerji kaynağından ısıyı çeker ve doymuş buhar fazında 8 durumunda evaporatörü terk eder. Türbine doymuş buhar olarak giren çalışma akışkanı türbini 9 durumunda kızgın buhar olarak terk eder. Kondenser 2 basıncına sahip akışkan 9 durumunda da kondenser 2'ye girer ve ısısını soğutma suyuna vererek yoğunlaşır. Akışkan 5 durumunda doymuş sıvı fazında kondenserden çıkar ve pompaya girer ve çevrim bu şekilde devam eder.

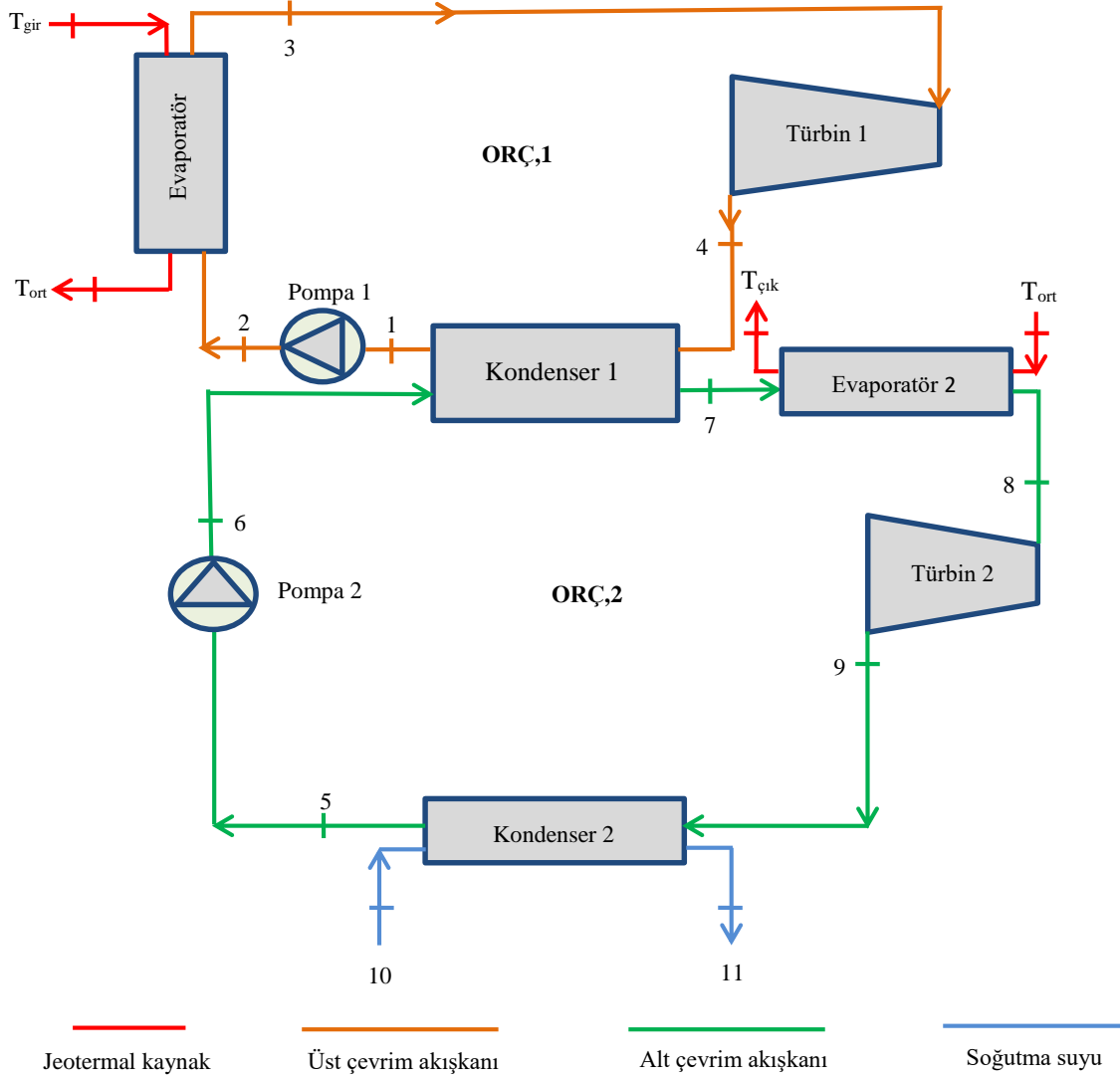


Şekil 2. TLÇ-ORÇ sisteminin T-s diyagramı

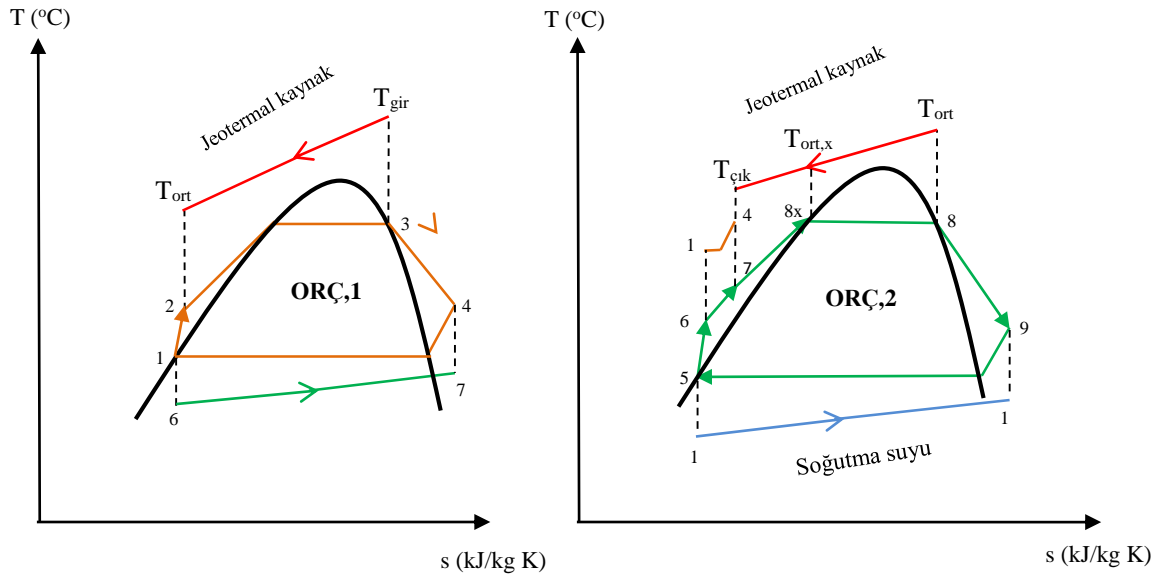
Figure 2. T-s diagram of the TLC-ORC system

Organik Rankine Çevrim – Organik Rankine Çevrim Birleşik Güç Sistemi (ORÇ-ORÇ) (Organic Rankine Cycle – Organic Rankine Cycle Combined Power System (ORC-ORC))

ORÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin çalışma prensibi TLÇ-ORÇ sisteminkine benzerdir ve sistem elemanları da TLÇ-ORÇ ile aynıdır. Sadece ORÇ'de genleştirici yerine türbin kullanılır. ORÇ-ORÇ birleşik güç sisteminde üst ve alt ORÇ döngülerinin çalışma akışkanları jeotermal kaynaktan ısı alırlar. Üst çevrimin kondenseri alt çevrimde TLÇ-ORÇ sisteminde olduğu gibi bir ön ısıtıcı görevindedir. Bu ön ısıtıcıyla üst çevrim ORÇ kondensерinden alt çevrim ORÇ çalışma akışkanı geçirilerek sıcak döngünün atık ısısı birleşik güç sisteminde geri kazanılır. Bu şekilde tek kademeli güç çevrimlerine göre daha yüksek ısıl verim ve net güç çıkışı elde etmek amaçlanır.



Şekil 3. ORÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin tesisat şeması
 Figure 3. Installation diagram of ORC-ORC combined power system



Şekil 4. ORÇ-ORÇ sisteminin T-s diyagramı

Figure 4. T-s diagram of the ORC-ORC system

Çalışma Akışkan Seçimi (Working Fluid Selection)

TLÇ-ORÇ ve ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemlerinin enerji analizleri için literatürden ve EES kütüphanesinden ORÇ'lerde kullanılan akışkanlar araştırıldı. Birleşik güç sistemlerinde kullanılacak çalışma akışkanlar seçilirken ORÇ'lerde daha önce kullanılmamış olan ve yeni nesil akışkanlar olmasına dikkat edildi.

Rankine çevriminin çalışma akışkanı olan su, ıslak bir akışkan olarak sınıflandırılır. Islak akışkanlarda genişleme sırasında oluşabilecek bir yoğuşmayı önlemek için akışkanın aşırı ısınması gerekmektedir. ORÇ'ler için ise aşırı ısınmayı gerektirmeyen sırasıyla sıfır (izentropik) ya da pozitif (kuru) eğilimli akışkanlar sistemde kullanılabilir en ideal akışkanlardır (Şahin ve diğ., 2018). Çünkü bu akışkanlar kullanıldığında türbinden çıkan akışkanın kuru kalması sağlanmış olur. Yani çalışma akışkanı, türbinden doymuş buhar veya kızgın buhar fazında çıkar.

Organik akışkanların suya göre kritik sıcaklık ve kritik basınç değerleri daha düşük, moleküler ağırlığı ise daha yüksektir. Bu özellikleri sayesinde ORÇ'lerinde sistem elemanlarının korozyona uğrama ihtimali düşer. Aynı zamanda ORÇ'lerde organik akışkanlar kullanıldığından çevrimin temiz ve daha verimli çalışması beklenir. ORÇ'nin çevreci özelliği ve çevrimde çalışma akışkanı olarak da kullanılan organik akışkanlar sayesinde sıcak kaynaktan da yüksek verim ile yararlanmak amaçlanır.

Birleşik güç sistemlerinde kullanılacak organik akışkanların A34GS (güvenlik sınıfı) yani çabuk alev alıcılığı ve yanıcılığının yanı sıra ODP (ozon delme potansiyeli) ve GWP (küresel ısınma potansiyeli) değerleri düşük akışkanlar olmalıdır. Çabuk alev alıcılığı ve yanıcılığı düşük olmayan akışkanlar seçilirse sistemde güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulacaktır.

Bu çalışmada araştırmalar sonucu ODP ve GWP açısından HCFC veya HFC grubu akışkanlarından çalışma akışkanı seçimi uygun olacaktır. Ayrıca güvenlik sınıfı açısından da Çizelge 2'deki güvenlik sınıflandırılması dikkate alınarak zehirliliği düşük olan A grubu organik akışkanları arasından akışkan seçimi yapılmıştır. Güvenlik sınıfı açısından hem zehirliliği düşük hem de yanıcılığı düşük akışkanların seçilmesi amaçlanmıştır. Bu kriterler dikkate alınarak Çizelge 2'deki akışkanlar bu çalışmada seçilmiştir.

Çizelge 2. Birleşik güç sistemlerinde kullanılacak çalışma akışkanlarının termodinamik güvenlik özellikleri (Bao ve Zhao, 2013, Hoang, 2018 ve S Klein ve S A, 2019)

Table 2. Thermodynamic safety properties of working fluids to be used in combined power systems (Bao ve Zhao, 2013, Hoang, 2018 ve S Klein ve S A, 2019)

Akışkan Grubu ve Adı	Molekül Ağırlığı (kg/kmol)	T _{kr} (°C)	P _{kr} (kPa)	A34GS	ODP	GWP	Tipi
Hidrokarbonlar							
Toluen	92.14	318.6	41.3	A3	0	3	Kuru
İsobutan (R-600a)	58.1	134.7	36.4	A3	0	20	Kuru
N-butan (R-600)	58.1	152	37.9	A3	0	20	Kuru
İsopentan (R601a)	72.15	187.2	33,7	A3	0	20	Kuru
N-pentan (R601)	72.14	196.5	33.6	A3	0	20	Kuru
Hidroflorokarbonlar							
R245fa	134.1	154	36.1	B1	0	1030	İzentropik
R365mfc	148.1	186.9	32.7	n.a	0	825	Kuru
R236ea	152.04	139.3	35	A1	0	710	Kuru
R152a	66.1	113.3	44.5	A2	0	124	Islak
SES36	184.9	177.6	28.49	A1	0	3710	Kuru

Enerji Analizi (Energy Analysis)

TLÇ-ORÇ ve ORÇ-ORÇ sistemlerinin termodinamik analizi, termodinamiğin birinci yasası ile genel enerji denklemleri kullanılarak her üç çevrim için belli kabuller dahilinde Engineering Equations Solition (EES) programı kullanılarak yapıldı.

Araştırılan birleşik güç sistemlerinin termodinamik analizi için yapılan kabuller:

- 1- Sistemden çevreye ısı kaybı yoktur.
- 2- Sistem elemanlarındaki ve bağlantı borularındaki basınç kayıpları ihmal edilecektir.
- 3- Jeotermal kaynağın akış debisi 30 kg/s'dir.
- 4- Genleştirici / türbin ve pompaların izentropik verimi 0.85'tir (Li ve diğ. 2019, Zeynali ve diğ. 2019 ve Yu ve diğ. 2018).
- 5- Alt ve üst çevrimlerin kondenser sıcaklıkları sırasıyla 30 °C ve 40 °C'dir.
- 6- Isı değiştiricilerinde (evaporatör ve kondenser) ısı alışverişinde bulunan iki akışkan arasındaki minimum sıcaklık farkı (pinch point) 5 °C'dir (Zhang ve diğ. 2019, Sun ve diğ. 2018 ve Sung ve diğ. 2019).

Birleşik güç sisteminin enerji analizi (Energy analysis of the combined system)

Yukarıdaki kabuller doğrultusunda üst çevrimde dolaşan debi denklem (1) ile bulunur.

$$\dot{m}_{jeo} C_{jeo} (T_{gir} - T_{ort}) = \dot{m}_{HTC} (h_3 - h_2) \quad (1)$$

Üst çevrimin genleştiricisinde/türbininde üretilen güç denklem (2), pompanın tükettiği güç ise denklem (3) ile elde edilir:

$$\dot{W}_{gen/t} = \dot{m}_{HTC} (h_3 - h_4) \quad (2)$$

$$\dot{W}_{p1} = \dot{m}_{HTC} (h_2 - h_1) \quad (3)$$

Üst çevrimin genleştirici/türbin ve pompa çıkışının gerçek çıkış entalpi değerleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanır:

$$h_4 = h_3 - (h_3 - h_{4s}) \eta_{gen/t} \quad (4)$$

$$h_2 = h_1 + (h_{2s} - h_1) / \eta_p \quad (5)$$

ORÇ'de dolaşan iş akışkanının debisi denklem (6)'dan bulunur.

$$\dot{m}_{jeo} C_{jeo} (T_{ort} - T_{ortx}) = \dot{m}_{LTC} (h_8 - h_{8x}) \quad (6)$$

Jeotermal akışkanın alt çevrimden çıkış sıcaklığı ($T_{\text{çık}}$) ve ORÇ evaporatörüne çalışma akışkanının giriş entalpisi denklem (7-8) ile hesaplanır.

$$\dot{m}_{\text{ORÇ}} (h_8 - h_7) = \dot{m}_{\text{jeo}} c_{\text{jeo}} (T_{\text{ort}} - T_{\text{çık}}) \quad (7)$$

Üst çevrimin çalışma akışkanından ORÇ çalışma akışkanına ısı geçişi

$$\dot{m}_{\text{LTC}} (h_7 - h_6) = \dot{m}_{\text{HTC}} (h_4 - h_1) \quad (8)$$

ORÇ türbin çıkışının gerçek entalpi değeri:

$$h_9 = h_8 - (h_8 - h_{9s}) \eta_t \quad (9)$$

ORÇ pompa çıkışının gerçek entalpi değeri:

$$h_6 = h_5 + (h_{6s} - h_5) / \eta_p \quad (10)$$

ile bulunur.

ORÇ türbininin ürettiği güç denklem (11), pompanın tükettiği güç ise denklem (12)'den elde edilir.

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{\text{LTC}} (h_8 - h_9) \quad (11)$$

$$\dot{W}_{p2} = \dot{m}_{\text{LTC}} (h_6 - h_5) \quad (12)$$

Birleşik güç sisteminin net güç çıktısı:

$$\dot{W}_{\text{net}} = (\dot{W}_{\text{gen}} + \dot{W}_t) - (\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) \quad (13)$$

ile hesaplanır.

Birleşik güç sisteminin jeotermal kaynaktan çektiği toplam ısı miktarı ise denklem (14) ile bulunur.

$$\dot{Q}_{\text{gir}} = \dot{m}_{\text{jeo}} c_{\text{jeo}} (T_{\text{gir}} - T_{\text{çık}}) \quad (14)$$

Birleşik güç sisteminin ısı verimi:

$$\eta_{\text{b,th}} = \dot{W}_{\text{net}} / \dot{Q}_{\text{gir}} \quad (15)$$

şeklinde hesaplanır.

BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS and DISCUSSIONS)

TLÇ-ORÇ ve ORÇ-ORÇ birleşik güç sistemleri için Çizelge 2'de seçilen çalışma akışkanları her bir birleşik güç sistemin hem alt hem de üst çevrimlerde kullandı. Sistemlerin termodinamik analizi yapıldı ve elde edilen sonuçlar ısı verim ve net güç çıkış değerleri açısından karşılaştırıldı.

TLÇ-ORÇ ve ORÇ-ORÇ Birleşik Güç Sistemlerinin Farklı Jeotermal Kaynak Sıcaklıkları için Enerji Analizleri (Energy Analysis of TLÇ-ORÇ and ORÇ-ORÇ Combined Power Systems for Different Geothermal Source Temperatures)

Farklı jeotermal kaynak sıcaklığı için birleşik güç sisteminin ısı verimini maksimum yapan akışkan çifti kullanıldığında sistemin performansının incelenmesi (Examination of the performance of the system when using the fluid pair that maximizes the thermal efficiency of the combined power system for different geothermal source temperatures)

İki birleşik güç sisteminin $T_{\text{EV},2} = 70$ °C'de 100 – 280 °C sıcaklık aralığında farklı jeotermal enerji kaynak sıcaklık değerleri için ısı verimi maksimum yapan akışkan çiftleri kullanılarak enerji analizleri yapılmıştır.

Jeotermal enerji kaynağının 100 – 280 °C sıcaklık aralığında ısı verimi maksimum yapan akışkan çiftinin Toluen – Toluen olduğu belirlendi ve bu akışkan çiftini kullanan sistemlerin karşılaştırmalı analiz sonuçları Çizelge 3'te sunuldu.

Çizelge 3. $T_{EV,2} = 70$ °C iken farklı jeotermal kaynak sıcaklıkları için enerji analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Table 3. Comparison of energy analysis results for different geothermal source temperatures when $T_{EV,2} = 70$ °C

T_{jeo} (°C)	TLÇ-ORÇ			ORÇ-ORÇ		
	$\eta_{b,th}$ (%)	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{Q}_{gir} (kW)	$\eta_{b,th}$ (%)	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{Q}_{gir} (kW)
100	9,33	340,2	21131	9,44	343,6	21034
120	9,38	619	17618	9,50	590,8	17551
140	9,42	905,9	14313	9,56	844,8	14269
160	9,46	1203	11155	9,62	1107	11128
180	9,50	1515	8100	9,67	1380	8086
200	9,55	1847	5118	9,76	1880	5112
220	9,59	2204	22992	9,82	2246	22877
240	9,63	2600	27006	9,87	2650	26850
260	9,67	3055	31594	9,92	3113	31387
280	9,71	3610	37170	9,96	3676	36904

Çizelge 3'ten jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça iki birleşik güç sistemin de ısıl verim değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum, ısıl verim denklemi dikkate alınacak olursa iki birleşik güç sistemin de \dot{W}_{net} ve \dot{Q}_{gir} değerleri arttığından ve \dot{W}_{net} 'teki artışın \dot{Q}_{gir} 'e kıyasla iki birleşik güç sistemde de daha fazla olması ile açıklanabilir. $T_{EV,2} = 70$ °C ve jeotermal kaynak sıcaklığının 100 °C'den 280 °C'ye arttığında Toluen – Toluen akışkan çifti ile çalışıldığında sistemin ısıl verimi yaklaşık TLÇ-ORÇ'de % 4,1 artarken, ORÇ-ORÇ'de % 5,6 artmaktadır.

Çizelge 3'te çalışılan jeotermal sıcaklıklarında ORÇ-ORÇ'nin ısıl verimi TLÇ-ORÇ'den % 1,1 - % 2,5 kadar daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni tüm sıcaklıklar için ORÇ-ORÇ'nin ürettiği güç değerinin jeotermal kaynaktan çektiği ısıya oranının az da olsa her zaman TLÇ-ORÇ'ninkine oranla daha yüksek olması ile açıklanabilir.

Çizelge 3'te her iki birleşik güç sistemin de ürettiği net gücün jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça arttığı görülmektedir. Bunun sebebi şöyle açıklanabilir: Jeotermal kaynağın artan sıcaklığıyla sistemlerin evaporatör 1 sıcaklıkları artar. Dolayısıyla genişleticiye/türbine daha yüksek basınçta akışkan girer ve bu da genişleticiden/türbinden elde edilen güç üretimini artırır böylece iki birleşik güç sistemde de net güç çıkış değerleri artar. Jeotermal kaynak sıcaklığı 100 – 280 °C sıcaklık aralığında artarken iki birleşik güç sistemin de net gücü değeri yaklaşık 10,5 kat artmaktadır.

Farklı jeotermal sıcaklığı için birleşik güç sisteminin net güç çıktısını maksimum yapan akışkan çifti kullanıldığında sistemin performansının incelenmesi (Examination of the system's performance when using a fluid pair that maximizes the net power output of the combined power system for different geothermal temperatures)

TLÇ-ORÇ ve ORÇ-ORÇ'de jeotermal kaynak gibi yenilenebilir veya atık ısıdan faydalanıldığı için ısıl verimden ziyade kullanılan ısı enerjisinden üretilen net güç açısından sistemi ele almak daha önemlidir. Bu yüzden sistemden elde edilen gücü maksimum yapan akışkan çiftleri araştırıldı ve her bir sistem için belirlenen akışkan çiftleri kullanılarak analizler yapıldı.

Çizelge 4. $T_{EV,2} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ için arasında değişen jeotermal kaynak sıcaklıkları için sistemin güç çıkışını maksimum yapan akışkan çifti kullanıldığında birleşik güç sistemlerinin enerji analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Table 4. Comparison of energy analysis results of combined power systems when using the fluid pair that maximizes the power output of the system for geothermal source temperatures ranging from $T_{EV,2} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

T_{jeo} (°C)	Akışkan Çifti		TLÇ-ORÇ			ORÇ-ORÇ		
	TLÇ - ORÇ	ORÇ - ORÇ	$\eta_{b,th}$ (%)	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{Q}_{gir} (kW)	$\eta_{b,th}$ (%)	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{Q}_{gir} (kW)
100	Toluen - R236ea	Toluen - R236ea	8,64	365	4224	8,82	371,8	4215
120			8,72	666,9	7648	8,95	681,9	7623
140			8,8	979,8	11139	9,1	1005	11088
160			8,87	1307	14728	9,2	1344	14641
175			8,93	1563	17511	9,26	1610	17377
180	R601a - R600	Toluen - R600a	9,12	1573	17248	9,28	1685	18161
190	R601 - R245fa	Toluen - R245a	9,2	1802	19621	9,5	1849	19484
200	R601 - R365mfc	Toluen - R365mfc	9,21	1955	21239	9,45	2001	21166
210	Toluen - Toluen	Toluen - R601	9,6	2022	21135	9,52	2158	22663

Jeotermal kaynak sıcaklığının 100 – 210 °C aralığında sistemin net güç çıktısını maksimum yapan akışkan çiftleriyle çalışıldığında jeotermal kaynağın artan sıcaklığıyla iki birleşik güç sistemin ısı verimleri, güç çıktıları ve jeotermal kaynaktan çekilen toplam ısı miktarının karşılaştırılması ise Çizelge 4'te sunulmuştur. Çizelgeye bakıldığında sistemin güç çıktısını maksimum yapan akışkan çiftinin jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

Jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça iki birleşik güç sistemin de ısı verim değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi daha önce açıklanmıştı. $T_{EV,2} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken jeotermal kaynak sıcaklığı 100 °C'den 175 °C'ye arttığında Toluen – R236ea akışkan çifti kullanan sistemin ısı verimi TLÇ-ORÇ'de % 3,32 artarken, ORÇ-ORÇ'de yaklaşık % 5 kadar artmaktadır.

Çizelge 4'te görüldüğü gibi ORÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin ısı verimi jeotermal sıcaklığın 210 °C durumu hariç her zaman TLÇ-ORÇ'den daha fazladır (% 1,7 – 3,4 kadar).

$T_{EV,2} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ORÇ-ORÇ sistemi ile 100 - 210 °C jeotermal kaynak sıcaklıklarında güç çıktısını maksimum yapan çalışma akışkan çiftleri kullanıldığında TLÇ-ORÇ sistemine göre daha yüksek net güç elde edildiği Çizelge 4'te görülmektedir. Araştırılan sıcaklık aralığının en yüksek değeri olan 210 °C jeotermal sıcaklık ve $T_{EV,2} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ çalışma şartlarında ORÇ-ORÇ'nin net güç değeri TLÇ - ORÇ sisteminden % 6,73 daha yüksektir.

Çizelge 4'te, 180 – 200 °C çalışılan jeotermal sıcaklık aralığında ORÇ-ORÇ sisteminde üretilen güç, TLÇ-ORÇ sisteminkinden % 2,4 – 7,1 daha yüksek olduğu görülmektedir.

Jeotermal sıcaklığı 220 – 280 °C için Toluen – Toluen akışkan çifti kullanıldığında sistemin hem ısı verimi hem de elde edilen güç maksimum olmaktadır. Bu nedenle bir önceki bölümde bu çalışma şartlarındaki sonuçlar sunulduğu için bu bölümde sunulmamıştır.

Alt Çevrim Evaporatörünün Farklı Sıcaklıkları için TLÇ-ORÇ ve ORÇ-ORÇ Birleşik Güç Sistemlerinin Termodinamik Analizi (Thermodynamic Analysis of TLÇ-ORÇ and ORÇ-ORÇ Combined Power Systems for Different Temperatures of Sub-Cycle Evaporator)

Bu bölümde jeotermal kaynağın 100, 140, 180, 190 ve 200 °C sıcaklık değerleri için çalışılan evaporatör 2 sıcaklığı için iki birleşik güç sisteminin için net güç çıkış değerlerinin karşılaştırmalı enerji analizi yapıldı. Çizelge 5'te jeotermal kaynağın bu çalışma sıcaklıkları için net güç çıkışını maksimum yapan akışkan çiftleri belirlendi.

Çizelge 5. Jeotermal kaynağın 100 – 280 °C sıcaklıkları için net gücü maksimum yapan akışkan çiftleri

T _{jeo} (° C)	Akışkan Çifti	
	TLÇ-ORÇ	ORÇ-ORÇ
100	Toluen – R236ea	Toluen – R236ea
140	Toluen – R236ea	Toluen – R236ea
180	R601a – R600	Toluen – R600a
190	R601 – R245fa	Toluen – R245fa
200	R601 – R365mfc	Toluen – R365mfc
210-280	Toluen – Toluen	Toluen – Toluen

Çizelge 6'da araştırılan her bir jeotermal sıcaklığında evaporatör 2 sıcaklığı arttıkça her iki birleşik güç sisteminde ısı veriminin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni evaporatör 2 sıcaklığı arttıkça \dot{Q}_{gir} değeri düşmekte ve \dot{W}_{net} değeri ise artmaktadır. Dolayısıyla ısı verim de artmaktadır. Çizelge 6'da T_{EV,2}'nin sıcaklık çalışma aralığı, evaporatör 2'den geçen çalışma akışkanlar arası sıcaklık farkı ve alt çevrim çalışma akışkanının kritik sıcaklığı dikkate alınarak belirlendi.

Çizelge 6'da T_{jeo} = 100 °C için ORÇ-ORÇ ve TLÇ-ORÇ birleşik güç sistemlerinin net güç çıkış değerlerinin T_{EV,2} = 65 °C'de, T_{jeo} = 140 °C için ise T_{EV,2} = 95 °C'de, T_{jeo} = 200 °C için ise T_{EV,2} = 120 °C'de maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir: Evaporatör 2'nin sıcaklığı arttıkça sabit jeotermal kaynak sıcaklığı için sistemde dolaşan debi miktarı düşmektedir. Fakat belli bir evaporatör 2 sıcaklığına kadar genleştirici/türbin giriş-çıkış arasındaki entalpi farkı artmakta ve bu noktada entalpi farkındaki artış debideki düşüş miktarından daha yüksek olduğu için üretilen güç maksimum değere ulaşmaktadır. Daha sonra evaporatör 2 sıcaklığı arttıkça (jeotermal sıcaklığa yaklaştıkça) entalpi farkı düşmekte ve sistemde üretilen net güç miktarı da azalmaktadır.

Çizelge 6. Jeotermal kaynağın 100, 140, 180, 190 ve 200 °C sıcaklıkları için farklı alt çevrim evaporatör sıcaklıkları için net güç için önerilen akışkan çiftleri kullanıldığında iki birleşik güç sisteminin enerji analizlerinin karşılaştırılması

Table 6. Comparison of energy analysis of two combined power systems using recommended fluid pairs for net power for different sub-cycle evaporator temperatures for temperatures of 100, 140, 180, 190 and 200 °C of the geothermal source

T _{jeo} (°C)	T _{EV,2} (°C)	TLÇ-ORÇ			ORÇ-ORÇ		
		η _{b,th} (%)	W _{net} (kW)	Q _{gir} (kW)	η _{b,th} (%)	W _{net} (kW)	Q _{gir} (kW)
100	45	4,01	274,1	6830	4,22	287,9	6819
	55	6,1	360,2	5937	6,26	371,2	5926
	65	7,85	380,5	4850	8,03	388,6	4840
	75	9,4	331,8	3536	9,56	337,2	3528
	90	11,3	115,8	1024	11,5	117,1	1021
140	45	4,2	523,9	12473	4,52	561,4	12428
	65	8,01	918,9	11479	8,28	946,5	11428
	75	9,53	1026	10758	9,79	1048	10707
	85	10,9	1071	9864	11,1	1089	9812
	95	12	1051	8766	12,2	1065	8715
180	130	14,7	302,1	2055	14,9	302,5	2032
	45	4,34	792,5	18266	4,6	829,1	18091
	85	11,3	1930	17086	11,5	1939	16896
	105	13,6	2175	15989	13,8	2174	15795
190	145	16,4	2369	14446	16,5	2337	14153
	55	8,66	1509	17429	6,72	1318	19637
	65	10,4	1788	17209	8,54	1667	19510
	75	11,9	2014	16911	10,2	1960	19307
	85	13,2	2189	16529	11,6	2198	19027
	95	14,4	2314	16063	12,8	2386	18672
	105	15,4	2391	15511	13,8	2526	18249
200	145	18,1	2360	13034	16,6	2914	17519
	70	9,21	1955	18342	9,32	1968	21125
	100	13,2	2655	17008	13,3	2658	19986
	110	14,2	2767	16314	14,3	2767	19333
	120	15,1	2819	15475	15,2	2815	18520
	130	15,9	2808	14477	16	2802	17529
	140	16,6	2732	13301	16,7	2724	16339
180	18,5	1713	6232	18,6	1696	9137	

Jeotermal sıcaklık 100 ve 140 °C için optimum evaporatör 2 sıcaklıklarında ORÇ-ORÇ'nin güç çıktısı TLÇ-ORÇ'den sırasıyla % 1,1 – 5 ve % 0,13 – 7,1 daha fazladır.

Çizelge 6'ya göre jeotermal kaynağın 100, 140, 180 ve 200 °C sıcaklıklarında çalışılan evaporatör 2 sıcaklıkları için ORÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin ısıl veriminin TLÇ-ORÇ sisteminkinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir; ORÇ-ORÇ'nin ürettiği net güç TLÇ-ORÇ'den daha yüksek, jeotermal kaynaktan çektiği enerji ise daha düşüktür. Bu iki etki ORÇ-ORÇ ısıl verimini daha yüksek yapmaktadır. Jeotermal kaynak sıcaklığı 100, 140, 180 ve 200 °C için optimum evaporatör 2 sıcaklıklarında ORÇ-ORÇ'nin ısıl verimi TLÇ-ORÇ'den sırasıyla % 1,4 – 5,2, % 1,3 - 7,5, % 0,7 – 5,6 ve % 0,32 – 1,2 kadar daha fazladır.

Jeotermal kaynak sıcaklığı 180 °C'de T_{EV,2} sıcaklığı 85 °C'ye kadar ORÇ-ORÇ sistemi ile TLÇ-ORÇ'ye göre % 0,46 - 4,6 arasında daha fazla güç üretildiği, 105 °C'de iki sistemin güç değerlerinin hemen hemen aynı olduğu, 145 °C sıcaklığı için ise TLÇ-ORÇ ile ORÇ-ORÇ'den % 2,43 arasında daha fazla güç

üretildiği görülmektedir. Çizelge 5'te jeotermal sıcaklık 200 °C'deyken çalışılan evaporatör 2 sıcaklıkları için ORÇ-ORÇ ve TLÇ-ORÇ birleşik güç sistemlerinin net güç çıkış değerlerinin $T_{EV,2} = 120$ °C'ye kadar artmış daha sonra azalmıştır. Evaporatör 2'nin 70 – 100 °C sıcaklık aralığında ORÇ-ORÇ'nin ürettiği net güç TLÇ-ORÇ'den daha yüksek, 110 °C'de iki sistemin güç değerleri eşit, 150 – 180 °C sıcaklık aralığında ise TLÇ-ORÇ sistemi ile ORÇ-ORÇ'den % 0,43 – 1 aralığında daha fazla güç çıkışı elde edilmiştir.

$T_{jeo} = 190$ °C'de ve $T_{EV,2}$ 'nin 55 – 145 °C sıcaklık aralığında R601a – R245fa akışkan çifti kullanıldığında $T_{EV,2}$ 'nin artan sıcaklığıyla ORÇ-ORÇ'nin ısı veriminin ve net gücünün arttığı görülmektedir. TLÇ-ORÇ'nin ürettiği net güç ise $T_{EV,2} = 105$ °C'ye kadar arttığı ve 145 °C'de ise az da olsa düştüğü görülmektedir.

Çalışılan evaporatör 2 sıcaklıkları için TLÇ-ORÇ birleşik güç sisteminin ısı verimi ORÇ-ORÇ sisteminden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir; Çizelge 6'ya bakıldığında evaporatör 2'nin 55 – 75 °C sıcaklık aralığında TLÇ-ORÇ'nin ürettiği net güç ORÇ-ORÇ'den daha yüksektir. Evaporatör 2'nin 85 – 145 °C sıcaklıklarında ise ORÇ-ORÇ ile elde edilen net güç değerleri daha yüksektir. Buna karşın ORÇ-ORÇ'nin jeotermal kaynaktan çektiği enerji tüm sıcaklıklar için TLÇ-ORÇ'den oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle de tüm evaporatör 2 sıcaklıkları için TLÇ-ORÇ sisteminin ısı verim değerleri daha yüksektir. Jeotermal kaynak sıcaklığı 190 °C'deyken evaporatör 2 sıcaklığı 55 °C'den 145 °C'ye kadar artarken ORÇ-ORÇ'nin ısı verim değeri % 6,7'den % 16,6'ya kadar artarken TLÇ-ORÇ'nin verim değeri ise % 8,656'dan % 18,1'e kadar artar. Ayrıca jeotermal sıcaklık 190 °C'de 145 °C evaporatör 2 sıcaklığı için ORÇ-ORÇ'nin ürettiği net güç % 23,5 daha fazladır.

Jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça her iki çevrimde de jeotermal kaynaktan çekilen toplam ısı miktarı azaldığı Çizelge 6'da görülmektedir. Bunun nedeni evaporatör 2 sıcaklığı arttıkça jeotermal akışkanın sistemden çıkış sıcaklığının artmasıdır. \dot{Q}_{gir} formülü düşünüldüğünde T_{jeo} , \dot{m}_{jeo} , ve C_{jeo} değerleri sistemlerde sabit kalırken T_{cik} değeri ise sürekli artmaktadır bu da \dot{Q}_{gir} değerini düşürmektedir.

Çizelge 6'da görüldüğü gibi araştırılan çalışma şartları için evaporatör 2 sıcaklığı arttıkça ORÇ-ORÇ ve TLÇ-ORÇ'nin güç çıkış değerleri artmış ve maksimum değere ulaşmıştır daha sonra ise azalmıştır. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir: Evaporatör 2'nin sıcaklığı arttıkça sabit jeotermal kaynak sıcaklığı için sistemde dolaşan debi miktarı düşmekte ve belli bir evaporatör 2 sıcaklığına (optimum evaporatör 2 sıcaklığına) kadar genleştirici/türbin giriş-çıkış arasındaki entalpi farkı artar. Bu noktada entalpi farkındaki artış debideki düşüş miktarından daha yüksek olduğundan üretilen güç maksimum değere ulaşır. Evaporatör 2 sıcaklığının artmaya devam etmesiyle de bu sıcaklık jeotermal kaynak sıcaklığına yaklaşır ve entalpi farkı düşer bu nedenle de sistemde üretilen net güç miktarı bu kez azalır.

Çizelge 7. $T_{jeo} = 210-280$ °C sıcaklıklarında değişen alt çevrim evaporatör sıcaklıkları için iki birleşik güç sistemin karşılaştırmalı enerji analiz sonuçları

Table 7. Comparative energy analysis results of two combined power systems for sub-cycle evaporator temperatures varying at $T_{jeo} = 210-280$ °C

T_{jeo} (°C)	$T_{EV,2}$ (°C)	TLÇ-ORÇ			ORÇ-ORÇ		
		$\eta_{b,th}$ (%)	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{Q}_{gir} (kW)	$\eta_{b,th}$ (%)	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{Q}_{gir} (kW)
210	45	4,31	971,8	22546	4,6	1024	22452
	85	12,2	2434	20022	12,4	2463	19925
	105	15,1	2745	18194	15,3	2765	18099
	125	17,5	2789	15904	17,7	2801	15815
	145	19,6	2559	13070	19,7	2565	12992
	165	21,3	2041	9582	21,5	2042	9520
	200	23,7	339	1432	23,8	338,4	1422
240	45	4,4	1227	27999	4,65	1296	27851
	85	12,2	3196	26170	12,4	3235	26010
	105	15,2	3744	24730	15,4	3771	24569
	125	17,6	4020	22864	17,8	4035	22705
	145	19,6	4022	20496	19,8	4028	20344
	165	21,3	3741	17530	21,5	3739	17391
	205	24	2215	9231	24,1	2207	9147
	230	25,2	449,6	1782	25,4	447,4	1764
280	45	4,5	1680	37551	4,8	1775	37302
	85	12,3	4513	36719	12,5	4564	36444
	105	15,2	5449	35820	15,4	5481	35534
	145	19,7	6454	32787	19,9	6455	32492
	165	21,4	6526	30504	21,6	6515	30213
	185	22,8	6295	27572	23	6274	27293
	205	24	5732	23846	24,2	5704	23589
	245	25,9	3388	13085	26	3362	12921
	270	26,8	718,1	2685	26,7	710,7	2646

Çizelge 7'ya bakıldığında $T_{jeo} = 210$ °C'den 280 °C'ye çıktığında ORÇ-ORÇ'den elde edilecek maksimum güç % 73,34 - 132,6 aralığında artarken TLÇ-ORÇ'den elde edilen maksimum güç ise % 30 - 134 aralığında artar. Ayrıca jeotermal kaynağın 210 , 240 ve 280 °C sıcaklık değerlerinin her biri için sistemde belli evaporatör 2 çalışma şartında maksimum güç çıkış değeri elde edilmiştir. Jeotermal sıcaklık 210 °C, 240 °C ve 280 °C için optimum evaporatör 2 sıcaklıkları sırası ile 125 °C, 125 °C ve 165 °C'dir. Sistemler bu optimum evaporatör 2 sıcaklık şartında çalıştırılmalıdır ve bu sıcaklık değerinde her iki sistemden elde edilen hem güç çıkış değerlerinin hem de ısıl verimlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS and OFFERS)

Bu çalışmada Trilateral çevrim - Organik Rankine çevrim ve Organik Rankine çevrim - Organik Rankine çevrim birleşik güç sistemlerinin performansını maksimum yapan akışkan çiftlerinin belirlenmesi ve birleşik güç sistemlerinin karşılaştırmalı enerji analizi Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılarak yapıldı. Farklı jeotermal kaynak ve alt çevrim evaporatörünün farklı sıcaklık değerleri için iki sistemin performansı karşılaştırıldı. Araştırma sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- 1- Araştırılan çalışma şartları için sistemin ısı verimini ve sistemde üretilen gücü maksimum yapan farklı çalışma akışkan çiftleri vardır.
- 2- Jeotermal kaynak sıcaklığı arttıkça iki birleşik güç sistemin de ısı verim değerleri artmaktadır.
- 3- Evaporatör 2 sıcaklığı arttıkça araştırılan iki birleşik güç sistemin de ısı verimi artmaktadır.
- 4- Jeotermal kaynağın her sıcaklığı için birleşik güç sistemlerinde maksimum gücün elde edildiği bir evaporatör 2 çalışma sıcaklığı vardır.
- 5- $T_{EV,2} = 70$ °C ve $100 - 280$ °C arasında değişen jeotermal kaynak sıcaklık değerlerinde ısı verimi maksimum yapan Toluen – Toluen akışkan çifti kullanıldığında ORÇ-ORÇ'nin ısı verimi % 1,1 – 2,5 arasında daha yüksektir.
- 6- $T_{EV,2} = 70$ °C ve jeotermal kaynak sıcaklığının $100 - 175$ °C aralığı için gücü maksimum yapan akışkan çifti kullanıldığında ORÇ-ORÇ'nin net güç çıkışı TLÇ-ORÇ'den değerleri % 1,9 – 3,01, $180 - 200$ °C sıcaklık aralığında ise % 1,73 – 3,33 daha yüksektir.
- 7- Jeotermal kaynak sıcaklığı 100 °C ve evaporatör 2'nin 65 °C sıcaklığı için ORÇ-ORÇ'nin net gücü TLÇ-ORÇ'den % 2,1, jeotermal kaynak sıcaklığı 140 °C ve 95 °C evaporatör 2'nin sıcaklığı için ise % 1,33 daha yüksektir.
- 8- Jeotermal kaynak sıcaklığı 180 °C ve evaporatör 2'nin 145 °C sıcaklığı için TLÇ-ORÇ'nin net gücü ORÇ-ORÇ'den % 1,4 daha yüksektir.
- 9- Jeotermal kaynak sıcaklığı 190 °C ve evaporatör 2'nin 145 °C sıcaklığı için ORÇ-ORÇ'nin net gücü TLÇ-ORÇ'den % 23,5 daha yüksektir.
- 10- Jeotermal kaynak sıcaklığı 200 °C ve evaporatör 2'nin 110 °C sıcaklığı için ORÇ-ORÇ'nin maksimum net gücü TLÇ-ORÇ ile eşit ve 2767 kW'tır.
- 11- Jeotermal kaynak sıcaklığı $210 - 280$ °C için gücü maksimum yapan evaporatör 2 sıcaklıkları vardır. Bu optimum sıcaklıklarda TLÇ-ORÇ ve ORÇ-ORÇ'den elde edilen maksimum güç hemen hemen aynıdır (güçler arasındaki fark % 0,14 - 0,43 kadardır). Aynı zamanda bu optimum sıcaklıkta ısı verimleri de çok yakındır (% 0,3 - 0,55).
- 12- Araştırılan çalışma şartları için Organik Rankine çevrim – Organik Rankine çevrim birleşik güç sisteminin kullanılması önerilir.
- 13- ORÇ ve TLÇ kullanılan birleşik güç sistemlerle çalışıldığında her çalışma şartı için akışkan çifti analizi yapılmalıdır.
- 14- Çalışma şartlarına bağlı olarak hangi birleşik güç sistem ile çalışmanın uygun olacağını belirlemek için karşılaştırmalı termodinamik analiz yapılmalıdır.
- 15- Çalışma şartlarına göre sistemden elde edilen gücü maksimum yapacak alt çevrim evaporatör sıcaklığı belirlenmeli ve buna göre sistem tasarlanmalıdır.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Mehmet Özçelik'in yüksek lisans tezinin bir kısmından oluşmaktadır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

Simgeler (Icons)

c	:	Özgül ısı	(kJ/kg K)
h	:	Entalpi	(kJ/kg)
\dot{m}	:	Kütleli debi	(kg/s)
P	:	Basınç	(kPa)

\dot{Q} :	:	Sistemin dışardan aldığı toplam ısı enerjisi	(kW)
s	:	Entropi	(kJ/kg K)
T	.	Sıcaklık	(°C)
\dot{W} :	:	Güç	(kW)
η	:	İzentropik verim	
$\eta_{b,ek}$:	Birleşik güç sistemin ekserji verimi	
$\eta_{b,th}$:	Birleşik güç sistemin ısı verimi	

Kısaltmalar (Abbreviations)

A36GS	:	Akışkan güvenlik sınıfı
CFC	:	Kloroflorokarbon
CNG	:	Sıkıştırılmış doğal gaz
EES	:	Engineering Equation Solver
GWP	:	Küresel ısınma potansiyeli
HCFC	:	Hidrokloroflorokarbon
HFC	:	Hidroflorokarbon
HFO	:	Hidrofloroolefin
ODP	:	Ozon delme potansiyeli
ORÇ	:	Organik Rankine Çevrimi
TLÇ	:	Trilateral Çevrim
1,2,...11	:	Çevrimlerdeki akışkanların termodinamik durumlarını belirten noktalar

Alt İndisler (Subscripts)

çık	:	Çıkan
EV	:	Evaporatör
gen	:	Genleştirci
gir	:	Giren

HTC	:	Alt Çevrim
jeo	:	Jeotermal kaynak
LTC	:	Üst Çevrim
ort	:	Ortalama
p	:	Pompa
P ₁	:	Pompa 1
P ₂	:	Pompa 2
t	:	Türbin
t ₁	:	Türbin 1
t ₂	:	Türbin 2



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Apostol V., Pop, H., Dobrovicescu, A., Prisecaru, T., Alexandru, A. ve Prisecaru, M., "Thermodynamic Analysis of ORC Configurations Used For WHR from a Turbocharged diesel engine", 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Austria, Vienna, 549-558, 20-29 November 2014.
- Bao J ve Zhao L., 2013, "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle", *Ren. And Sus. En, Rev*, Vol. 24, pp. 325-342.
- Braimakis, K. ve Karellas, S., 2018, "Exergetic optimization of double stage Organic Rankine Cycle (ORC)", *Energy*, Vol. 149, pp. 296-313.
- Hoang A.T., 2018, "Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle" *App. En.*, Vol. 231, pp. 138-166.
- Li, Z., Huang, R., Lu, Y., Roskilly, A.P. ve Yu, X., 2019, "Analysis of a combined trilateral cycle - organik Rankine cycle (TLC-ORC) system for waste heat recovery", *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 1786-1791.
- Lu, X., Zhao, Y., Zhu, J. ve Zhang, W., 2018, "Optimization and applicability of compound power cycles for enhanced geothermal systems", *App. En.*, Vol. 229, pp. 128-141.
- Mohammadkhani, F. ve Yari, M., 2019, "A 0D model for diesel engine simulation and employing a transcritical dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery from its exhaust and coolant: Thermodynamic and economic analysis", *App. Ther. Eng.*, Vol. 150, pp. 329-347.
- Song, J. ve Gu, C., 2015, "Parametric analysis of a dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) system for engine waste heat recovery", *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 995-1005.
- Sun J, Liua Q ve Duan Y., 2018, "Effects of evaporator pinch point temperature difference on thermoeconomic performance of geothermal organic Rankine cycle systems", *Geothermics*, Vol. 75, pp. 249-258.
- Sung, T., Yun, E., Kim, H.D., Yoon, S.Y., Choi, B.S., Kim, K., Kim, J., Jung, Y.B. ve Kim, K.C., 2016, "Performance characteristics of a 200-kW organic Rankine cycle system in a steel processing plant", *Applied Energy*, Vol. 183, pp. 623-635.
- S Klein ve S A 2019. EES (Engineering Equation Solver), Academic Professional Version, F-Chart Software Madison, WI, USA.

- Şahin, R., Ata S. ve Kahraman A., 2018, "Organik Rankine Çevriminde Farklı Tip Akışkanlarda Türbin Giriş Sıcaklığı ve Basıncının Sistem Bileşenlerindeki Tersinmezlik Değerlerine Etkisinin Belirlenmesi", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol. 33, No:2, pp. 225-236.
- Wang, E. H., Zhang H. G., Fan, B. Y., Ouyang, M. G., Yang F. Y., Yang, K., Wang, Z. Zhang J., ve Yang, F. B., 2014, "Parametric analysis of a dual-loop ORC system for waste heat recovery of a diesel engine", App. Ther. Eng., Vol. 67, pp. 168-178.
- Yang, F., Zhang, H., Yu, Z., Wang, E., Meng, F., Liu, H. ve Wang, J., 2017a, "Parametric optimization and heat transfer analysis of a dual loop ORC (organic Rankine cycle) system for CNG engine waste heat recovery", Energy, Vol. 113, pp. 753-775.
- Yang, F., Cho, H., Zhang, H. ve Zhang, J., 2017b, Thermo-economic multi-objective optimization of a dual loop organic Rankine cycle (ORC) for CNG engine waste heat recovery, Applied Energy, Vol. 205, pp. 1100-1118.
- Yu, X., Li, Z., Lu, Y., Huang, R. ve Roskilly, A. P., 2018, "Investigation of an Innovative Cascade Cycle Combining a Trilateral Cycle and an Organic Rankine Cycle (TLC-ORC) for Industry or Transport Application", Energies, Vol. 11, pp. 3032.
- Zeynali A, Akbari, A ve Khalilian M., 2019, "Investigation of the performance of modified organic Rankine cycles (ORCs) and modified trilateral flash cycles (TFCs) assisted by a solar pond", Solar Energy, Vol. 182 pp. 361-381.
- Zhang X, Wua Y, Lia Z ve Chen Y., 2019, "A hybrid flue gas heat recovery system based on vapor compression refrigeration and liquid desiccant dehumidification", En. Con. And Man., Vol. 195 pp. 157-166.



PİŞİRME EKİPMANI KAYNAKLI AĞIR METALLERİN TESPİT EDİLMESİ; NOHUT ÖRNEĞİ

¹Görkem TEYİN , ²Hatice Ferhan NİZAMLIOĞLU 

¹Doğuş Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, İstanbul,
TÜRKİYE

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹gteyin@dogus.edu.tr, ²hfnizamlioglu@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 11.03.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.06.2021)

ÖZ: Bu çalışma ile çelik, teflon, alüminyum ve bakır ekipmanlarda pişirilen nohut örneğine, pişirme ve depolama süresi ile geçebilecek ağır metallerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Pişirilen ve depolanan numunelerin, mikrodalga çözündürme işleminin ardından mikro ve toksik düzeydeki element konsantrasyonları ICP-OES cihazı ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar pişirme ve depolama süresi olarak iki varyasyonda karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Araştırmada Alüminyum, Kadmiyum, Krom, Bakır, Demir, Mangan, Nikel ve Kalay için tespit edilen değerler ortalama olarak sırasıyla, $850\pm 71-27.5\pm 5.6$, $0.026\pm 0.003-0.011\pm 0.007$, $11.0\pm 2.4-6.01\pm 0.36$, $13.5\pm 1.1-12.0\pm 1.8$, $171\pm 13-66.7\pm 4.25$, $47.5\pm 3.1-30.1\pm 1.3$, $6.25\pm 0.55-3.38\pm 0.29$ ve $20.5\pm 2.0-0.179\pm 0.014$ mg/kg'dır. Çalışmada Kurşun belirlenememiş olup, çiğ nohut numuneleri için belirlenen element seviyeleri ise; Alüminyum 1.409, Krom 8.225, Mangan 34.46, Demir 121, Nikel 3.646, Bakır 13.61, Kadmiyum 0.017 ve Kalay 0.391 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Çalışmada en yüksek geçiş Alüminyum elementinde gerçekleşmiştir. Bu geçiş 850 ± 17 mg/kg ile eski teflon ekipmanda pişirmede ve 516 ± 14 mg/kg ile Alüminyum ekipmanda depolamada gerçekleşirken, en düşük geçiş ise Kadmiyum elementinde $0,011$ mg/kg ile çelik ekipmanda gerçekleşmiştir. Sonuçta pişirme ekipmanlarının cinsine bağlı olarak gıdalara pişirme ve depolama süresi ile ağır metal geçişinin gerçekleştiği, bu geçişin pişirmenin ardından elementlerin ham olarak kullanıldığı alüminyum ve demir gibi ekipmanlarda daha yüksek seviyede olduğu, aynı zamanda depolama ile adsorbsiyona bağlı olarak genel anlamda geçişin, pişirmeye oranla daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ağır metal, Pişirme ekipmanı, Gıda, Gastronomi, Gıda güvenliği

The Detection of Heavy Metals in Relation of Cooking Equipment; Chickpea Sample

ABSTRACT: With this study, it is aimed to detect the levels of heavy metals which can be migrated to the chickpea sample cooked in steel, teflon, aluminium and copper equipment by cooking and storage. The micro and toxic element concentrations of the cooked and stored samples were determined with the ICP-OES device after microwave digestion. The results obtained were interpreted by comparing in two variations as cooking and storage time. In the research, ICP-OES obtained for Aluminum, Cadmium, Chromium, Copper, Iron, Manganese, Nickel and Tin are in the same order, $850\pm 71-27.5\pm 5.6$, $0.026\pm 0.003-0.011\pm 0.007$, $11.0\pm 2.4-6.01\pm 0.36$, $13.5\pm 1.1-12.0\pm 1.8$, $171\pm 13-66.7\pm 4.25$, $47.5\pm 3.1-30.1\pm 1.3$, $6.25\pm 0.55-3.38\pm 0.29$ and $20.5\pm 2.0-0.179\pm 0.014$ mg/kg. Pb could not be determined and the element levels specified for raw chickpea samples are; Aluminum 1.409, Chromium 8.225, Manganese 34.46, Iron 121, Nickel 3.646, Copper 13.61, Cadmium 0.017 and Tin 0.391 mg/kg. The highest migration detected in the study occurred in aluminum element. This migration occurred in cooking in old teflon equipment with 850 ± 17 mg/kg and storage in Aluminum equipment with 516 ± 14 mg/kg, while the lowest migration was in steel equipment

with 0.011 mg/kg of Cadmium element. As a result, depending on the type of cooking equipment, it has been observed that there is a heavy metal migration to food, with cooking and storage conditions, this migration is higher in equipment such as Aluminum and Iron, where elements are used raw after cooking, in addition, due to storage and adsorption, overall migration is lower than cooking.

Keywords: *Heavy metal, Cooking equipment, Food, Gastronomy, Food safety*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gıda güvenliği konusu halk sağlığının korunması, sağlıklı toplumların oluşturulması ve sürdürülmesi açısından bütün dünyada önemli bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Son zamanlarda ağır metaller, pestisitler ve bazı toksinler tarafından kontamine olan gıda maddelerinin tüketiminde yaşanan artış, gıda güvenliği uygulamalarının gelişimini gerekli kılmış ve çalışmaları da hızlandırmıştır (Radwan ve Salama, 2006).

Yer kabuğunda doğal olarak bulunan ağır metallerin insani faaliyetler sonucu yaşam alanları ve su kaynaklarına salınmalarının çok ciddi sağlık ve çevre sorunlarına neden olduğu bilinmektedir (Uddin, 2016). Ağır metaller, biyolojik olarak bozulmayan yapıları ve vücudun farklı bölümlerinde birikme potansiyelleri sebebiyle insan sağlığı için de oldukça zarar verici unsurlardır (Arora vd., 2008). Ağır metallerin insan sağlığının yanı sıra hayvanlar, bitkiler ve bütün ekosistem için büyük tehlike oluşturduğu bilinen bir gerçektir (Dabonne vd., 2010). Bundan dolayı gerek insanlar gerekse hayvanların tüketeceği gıdalardaki ağır metal oluşumunun takibi ve tespiti organizmalarda toksik etki göstermesi nedeniyle merak uyandırıcıdır (Uriah, Dungrit, ve Rhoda, 2014). Artan endüstriyel faaliyetler, tarımda kimyasal kullanımının yükselmesi ve gelişen teknoloji, ağır metallerin gıdalara bulaşma olasılığını arttıran başlıca unsurlardır. Hava, toprak ve su kirliliği, insan sağlığı için oldukça tehlikeli olan Civa, Arsenik ve Kurşun gibi ağır metallerin konsantrasyonunun artışına ve ciddi sağlık sorunlarına zemin hazırlamaktadır (Zukowska ve Bızıuk, 2008). Ağır metallerin birçok bulaşma kaynağı olmasına karşın bilinen en önemli bulaşma kaynağı günlük beslenmedeki yemeklerimiz aracılığıyla vücuda aldığımız ağır metaller olarak açıklanmaktadır (Naseri vd., 2014). Bunun yanında ağır metaller, insanlara ve çevreye doğal kaynaklı bulaşanlar ve insan kaynaklı bulaşanlar olarak iki farklı şekilde bulaşabilmektedir. Minerallerin hava ve rüzgâr aracılığıyla sürüklenmesi, volkanik patlamalar ve erozyon ağır metallerin doğal orjinli bulaşma kaynaklarının başında sayılabilmektedir. Endüstriyel faaliyetler, motorlu taşıtlar, madencilik, termik santraller ve tarımsal faaliyetler (pestisitler, gübreleme, vb.) ise insan kaynaklı bulaşma yolları arasında sayılabilmektedir (Chehregani ve Malayeri, 2007).

Son dönemlerde gıda ile temas eden ambalajlardan, pişirme ekipmanlarından vb. gıdalara ağır metal geçişi konusu önemini hızla arttırmış ve üzerinde sıklıkla durulan bir konu haline almıştır. Gıda ile temasın ardından açığa çıkan madde transferi olayı 'migrasyon' olarak açıklanmaktadır (Biricik, Çöplü ve Dağdelen, 2015). Gıdalar muhafaza edildikleri materyallerden, mutfaklarda pişirmede kullanılan ekipmanlara kadar birçok unsur ile yakın temas halindedir. Bu sebepten dolayı pişirme ile birlikte gıdanın mevcuttaki ağır metal yükünde değişiklikler yaşanabilmektedir. Pişirme; mevcut tatlarının, kıvamlarının, renklerinin, şekillerinin ve yapılarının değiştirilmesi suretiyle gıdalara yenilebilme özelliğinin kazandırılması için yiyecek maddelerinin belirli bir süre ısı ile muamele edilmesi olarak açıklanır (Eraslan, 2013). Mutfaklarda kullanılan en temel pişirme yöntemleri ise; suda pişirme, buharda pişirme, kuru ısıda pişirme ve yağda pişirme şeklinde sınıflandırılabilir (Dağ, 2006).

Gerek endüstriyel gerekse ev mutfaklarında kullanılan gıdalarla doğrudan temas halinde olan temel pişirme ekipmanlarının (tencereler, tavalar, tepsiler ve ızgaralar vb.) materyallerinin, yiyecek maddeleri ile reaksiyona girerek gıdaların lezzetinde ve mevcut yapısal özelliklerinde değişikliğe ya da bozulmaya neden olmalarını gerektirmektedir (McGee, 2004; Gisslen, 2011). Konuya yönelik yapılan bazı çalışmalar, özellikle pişirme esnasında kullanılan ekipmanlardan gıdalara ağır metal geçişinin gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Sözü edilen bu pişirme ekipmanlarının üretiminde kullanılan temel malzemeler ise; bakır, alüminyum, demir, çelik, gümüş, emaye kaplama, teflon kaplama vb. materyallerdir (Baş, 2004; McGee,

2004). Alüminyum, çelik, bakır gibi ekipmanlar üretilirken elementler ham olarak kullanılmakta ve bu durum bazı etmenler neticesinde migrasyona sebep olabilmektedir. Teflon kaplar çelik veya emaye üzerine floropolimer bir madde olan PTFE (politetrafloroetilen) kaplanmasıyla elde edilmektedir (Akıncı, Akbulut ve Yılmaz, 2003). Zaman içerisinde kaplamanın aşınması çeliğin ortaya çıkmasına sebebiyet vererek tıpkı çelik tencerelerde olduğu gibi ağır metal kontaminasyonuna sebebiyet verebilmektedir. Pişirme ekipmanlarından gıdalara geçebilecek ağır metal düzeyi zaman içerisinde kullanım şekline de bağlı olarak artmakta ve insan sağlığını tehdit edecek seviyelere ulaşabilmektedir.

Ağır metallerle maruz kalma limitleri dünyada ve ülkemizde yasal sınırlarla belirlenmiş olup, konuya dair TKG (Türk Gıda Kodeksi), JECFA (Gıda Katkıları FAO/WHO Ortak Komitesi), EC (Avrupa Topluluğu Direktifleri), EFSA (Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi) ve CAC (Kodeks Alimentarius Komisyonu) gibi ulusal/uluslararası kuruluşların belirlemiş olduğu bir takım yasal limitler bulunmaktadır (Biricik, Çöplü ve Dağdelen, 2015).

Yapılan bu çalışmada endüstriyel ve ev mutfaklarında ağırlıklı olarak kullanılan çelik, teflon, alüminyum ve bakır pişirme ekipmanlarından pişirme ve depolama süresince nohut örneğine ağır metal geçişinin tespit edilmesi, ayrıca elde edilen bulgular sonucunda migrasyon miktarlarının ortaya koyulması amaçlanmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada materyal olarak alüminyum, çelik, bakır ve teflon pişirme ekipmanları, pişirilecek gıda ürünü olarak ise bir kurubaklagil olan nohut (tek bir markaya ait aynı partiden) örneği kullanılmıştır. Çalışmada teflon ekipman iki varyasyon olarak kullanılmıştır. İlkinde hiç kullanılmamış, ikincisinde ise yaklaşık olarak iki yıldır kullanımı olan yıpranmış teflon kap kullanılmıştır. Pişirme yöntemi olarak çalışmada kullanılacak ekipmanlarda uygulamaya müsait olduğu için haşlama (boiling) yöntemi tercih edilmiştir. Numune olarak nohut tercih edilmesindeki temel sebep ise nohut örneğinin daha uzun sürede pişmesi, materyalle temasın daha uzun süreli olması, dolayısıyla da migrasyonun daha iyi gözlemlenebilmesidir.

Örneklerin Analize Hazırlanması (Preparation of Samples for Analysis)

Aynı marka ve partiden alınan 350 gr'lık nohut örnekleri ayrı ayrı pişirme materyallerine konulup, üzerlerine 1 litre içme suyu ilave edilerek 24 saat bekletilmiştir. Bu yöntemde besin maddelerinin uzun sürede pişmeleri ve buharlaşma gibi koşullar göz önüne alınarak 1 litre suda pişirme yapılması uygun görülmüştür. Ayrıca bu işlem standart nohut pişirme işlemine olduğu gibi pişirme işlemini kolaylaştırmak için de gerçekleştirilmiştir. Nohut örneğinin pişirme ekipmanına teması öncesi mevcut ağır metal yükünün tespit edilmesi amacıyla 350 gr referans numune alınmıştır. Aynı şekilde pişirmede kullanılacak olan içme suyundan da herhangi bir kontaminasyon olmasını engellemek amacıyla 100 ml örnek alınmıştır. Ardından pişirme ekipmanları içerisindeki örnekler ocağa alınıp, orta ısı seviyesinde nohut örneklerinin suyun tamamını çekecek şekilde pişmesi sağlanmıştır. Pişirme işleminin ardından desikatörde 1-2 saat soğutulan örnekler numune poşetine alınıp, homojenizasyon işlemine kadar buzdolabında +4°C de muhafaza edilmiştir. Depolama süresince geçebilecek ağır metal düzeyinin tespit edilmesi için örneklere aynı işlemler uygulanmış olup, harici olarak örnekler pişirildikleri kaplarda iki gün +4°C de muhafaza edildikten sonra işleme alınmıştır. Çizelge 1'de hazırlık işlemlerine ilişkin bilgiler yer almaktadır.

Örnekler hazırlık laboratuvarına getirildikten sonra havanda ezilerek homojen bir hale getirilmiştir. Bu noktada havanın tercih edilmesinin sebebi ise homojenizatör kaynaklı bulaş riskini ortadan kaldırmaktır. Homojenizasyonun ardından üç tekrar çalışılacağı için ve şahit numunelerin de bir süre saklanacağı göz önüne alındığından 350 gr olarak tartılan örnekler yağlı kağıt üzerine alınarak etüvde (Nüve marka, EN 400 model) 24 saat süreyle 80°C sıcaklıkta kurutulmuştur (Leblebici ve Aksoy, 2008).

Çizelge 1. Hazırlık İşlemine İlişkin Bilgiler*Table 1. Information on the Preparing Process*

Örnek Miktarı (gr)	Su Miktarı (lt)	Bekletme Süresi (sa)	Piştirme Süresi (dk)	Depolama Süresi (gün)	Depolama Sıcaklığı (°C)
350 gr	1 lt	24 saat	1 saat 10 dk	2* gün	+4°C

*Depolama süresi için gerekli olan bekleme süresidir.

Mikrodalga Yaş Yakma İşlemi ve ICP-OES İle Analiz (Microwave Wet Burning Process and Analysis with ICP-OES)

Homojenizasyonu sağlanıp, etüvde kurutma işleminin ardından enstrümental analiz laboratuvarına getirilen örnekler hassas terazide 0,5 gr olacak şekilde tartılarak, üzerlerine Nitrik Asit (10 ml %65'lik HNO₃, MERCK) çözeltisi ilave edilmiştir. Çözme işlemi mikrodalga fırında (Cem marka Mars 5 model) yüksek sıcaklığa ve yüksek basınca dayanabilen uygun teflon kaplar içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2'de çözündürme işlemine ilişkin koşullar yer almaktadır.

Çizelge 2. Mikrodalga Çözündürme İşlemi Koşulları*Table 2. Microwave Defrosting Process Conditions*

Maximum Güç	Güç	Ramp Time	Basınç	Sıcaklık	Hold Time
1200W	%100	20 dk	180 psi	210°C	10 dk

Yaş yakma işlemini takiben mikrodalga fırından alınan numunelerin üzerine Nitrik Asit (10 ml %65'lik HNO₃, MERCK) çözeltisi eklenerek mavi bant süzgeç kağıdından süzülmesi sağlanmıştır. Mavi bant süzgeç kağıdı gözenekleri sık bir süzgeç kağıdındır. ICP-OES için numunelerin süzüntü haline getirilmesi, partikül vs. içermemesi esastır. Oluşan süzüntü üzerine okumaların daha sağlıklı yapılabilmesi adına bir kez daha Nitrik Asit (10 ml %65'lik HNO₃, MERCK) çözeltisi ilave edilerek süzme işlemi aynı koşullar altında tekrar edilmiştir. Oluşan son örnek çözelti karışımı 25 ml'lik balon jöjelere aktararak ölçü çizgisine kadar Nitrik Asit (%65'lik HNO₃, MERCK) çözeltisi ile 25 ml'ye tamamlanmıştır. Çalışmanın bazı aşamalarında kullanılan saf suyun da ultra distile (yüksek saflıkta) olmasına özen gösterilmiştir. (Leblebici ve Aksoy, 2008; Karcık, 2017).

Gerçekleştirilen bu işlemlerin ardından örneklerin Alüminyum, Kurşun, Kadmiyum, Demir, Bakır, Krom, Kalay, Nikel ve Mangan konsantrasyonları ICP-OES (Perkin Elmer marka, OPTİMA 4300 DV model) cihazında uygun dalga boyları kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan dalga boylarına ilişkin veriler Çizelge 3'de yer almaktadır. Analiz edilecek elementlere dair standartlardan (1000 ppm, CPI International Analytical and Life Science Solutions stok çözelti) 10 ppm ana stok çözeltisi hazırlanarak, analizi yapılacak elementlere ilişkin uygun standartlar ana stok üzerinden seyreltilmiştir. İncelenecek her element için kalibrasyon eğrileri oluşturularak, şahit numune için de aynı işlemler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her bir örnek üç tekrar olacak şekilde yapılmıştır. Elde edilen verilerin ve tekrarların istatistiksel olarak ortalama değer, aritmetik ortalama ve standart hataları hesaplanmıştır. Ayrıca örneklerde piştirme ve depolama süresince geçişi olan ağır metal yükünün tespit edilmesi, aynı zamanda iki grup arasındaki karşılaştırmaların yapılabilmesi için bağımlı örneklem t testi değeri (Paired Sample t-Test) SPSS 15.0 paket programı kullanılarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. ICP-OES Cihazında Elementlerin Analizinde Kullanılan Dalga Boyları*Table 3. Wavelengths Used in Analysis of Elements in ICP-OES Device*

Element	Dalga Boyu (nm)
Kurşun (Pb)	220,353
Kadmiyum (Cd)	214,483
Demir (Fe)	259,941
Bakır (Cu)	327,396
Krom (Cr)	267,716
Nikel (Ni)	231,604
Kalay (Sn)	189,991
Civa (Hg)	194,227
Çinko (Zn)	206,200

BULGULAR (RESULTS)**Çizelge 4.** Farklı Pişirme Ekipmanlarında Pişirilen Nohut Örneğindeki Ağır Metallerin Ortalama Konsantrasyonları (mg/kg)*Table 4. Average Concentrations of Heavy Metals in a Chickpea Sample Cooked in Different Cooking Equipment*

Ağır Metal	Alüminyum (Al)	Krom (Cr)	Mangan (Mn)	Demir (Fe)	Nikel (Ni)	Bakır (Cu)	Kadmiyum (Cd)	Kalay (Sn)	Kurşun (Pb)	
Pişirme Öncesi	Su (Ham)	0,12	0,004	0,001	0,18	0,003	0,001	t.e.	t.e.	t.e.
	Nohut (Ham)	1,4	8,2	34,4	121	3,6	13,6	0,017	0,391	t.e.
Pişirme Sonrası Ekipman	Bakır tencerede pişirme	174±2	7,74±0,68	47,5±3,1	171±13	5,19±0,36	12,2±1,1	0,015±0,004	12,1±1,7	t.e.
	Bakır tencere depolama	124±19	6,01±0,36	30,1±1,3	66,7±4,25	3,38±0,29	12,3±0,2	0,026±0,003	6,45±0,21	t.e.
	Alüminyum tencerede pişirme	239±33	9,55±1,65	45,6±0,6	108±11	6,25±0,55	12,1±0,3	0,017±0,005	20,5±2,0	t.e.
	Alüminyum tencere depolama	516±14	10,2±2,4	31,9±1,7	118±9	3,88±0,72	12,6±0,6	0,024±0,002	0,518±0,039	t.e.
	Çelik tencerede pişirme	165±13	11,0±2,4	44,3±3,9	136±3	6,09±0,46	12,4±1,3	0,011±0,007	9,57±0,49	t.e.
	Çelik tencere depolama	62,1±6,2	8,15±0,71	33,3±4,1	117±3	3,45±0,46	12,3±1,6	0,022±0,011	0,319±0,036	t.e.
	Yeni teflon da pişirme	235±8	10,5±1,9	42,3±3,6	103±13	5,63±0,56	12,0±1,8	0,023±0,016	1,20±0,23	t.e.
	Yeni teflon depolama	48,9±0,8	8,97±0,88	34,9±2,1	122±10	3,80±0,25	13,5±1,1	0,018±0,004	0,287±0,021	t.e.
	Eski teflon da pişirme	850±71	9,17±0,08	47,2±3,7	100±8	5,80±0,29	12,6±0,2	0,019±0,0053	1,47±0,15	t.e.
	Eski teflon depolama	27,5±5,6	8,18±0,58	33,1±2,6	103±3	3,50±0,09	12,6±0,6	0,016±0,002	0,179±0,014	t.e.

*Tüm sonuçlar %95 güven aralığında ve ortalama ± standart sapma şeklinde verilmiştir (p<0,05).

** Verilen değerler üç tekrüre ait analiz değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

t.e. : tespit edilemedi

Çizelge 4’de yer alan bilgiler ışığında, Alüminyum miktarı, pişirme öncesi su ve çiğ nohut örneğinde sırasıyla 0.12 mg/kg ve 1.4 mg/kg olarak ölçülürken, pişirme işlemi ardından elde edilen nohut numunelerinde en düşük konsantrasyon (165±13 mg/kg) çelik tencerede, en yüksek konsantrasyon (850±71 mg/kg) ise eski teflon tencerede pişen nohut numunesinde gerçekleşmiştir. Krom miktarı, su ve çiğ nohutta sırasıyla 0.004 mg/kg ve 8.2 mg/kg şeklinde ölçülürken, pişen numunelerde en düşük seviye (6,01±0,36 mg/kg) bakır tencere ile depolamada, en yüksek seviye (11,0±2,4 mg/kg) ise çelik tencerede pişirilen nohut numunelerinde tespit edilmiştir. Mangan miktarı, su ve çiğ nohutta sırasıyla 0.001 mg/kg ve 34.4 mg/kg seviyesinde tespit edilirken, pişirilen nohut örneklerinde en düşük seviye (30,1±1,3 mg/kg) bakır tencere depolamada ve en yüksek seviye (47,5±3,1 mg/kg) ise bakır tencerede pişirilmiş numunede saptanmıştır. Demir miktarı, su ve çiğ nohut örneğinde sırasıyla 0.18 mg/kg ve 121 mg/kg seviyelerinde tespit edilirken, pişirilen nohut numunelerinde en düşük 66,7±4,25 mg/kg seviyesinde bakır tencere ile depolamada ve en yüksek 171±13 mg/kg olarak bakır tencerede pişirilen numunede tespit edilmiştir. Nikel düzeyi, su ve çiğ nohutta sırasıyla 0.003 mg/kg ve 3.6 mg/kg olarak ölçülürken, pişirilmiş nohut örneklerinde en düşük 3,38±0,29 mg/kg düzeyinde bakır tencere depolamada ve en yüksek 6,25±0,55 mg/kg olarak alüminyum tencerede pişirilen numunelerde tespit edilmiştir. Bakır seviyesi, su ve çiğ nohut örneğinde sırasıyla 0.001 mg/kg ve 13.6 mg/kg seviyelerindeyken, tüm ekipmanlarda pişirilen nohut örneklerinde elde edilen en düşük ve en yüksek konsantrasyonlar (12,0±1,8 mg/kg ve 13,5±1,1 mg/kg) ile çiğ örneğin mevcut bakır yükü arasında çok fazla fark gözlemlenmemiştir. Kadmiyum elementine suda rastlanmazken, çiğ nohutta 0.017 mg/kg olarak belirlenmiş, pişmiş nohut numunelerinde ise en düşük seviye (0,011±0,007 mg/kg) çelik tencerede, en yüksek seviye ise (0,026±0,003 mg/kg) bakır tencerede pişirilip iki gün depolama koşulu ardından ölçülmüştür. Kalay ise pişirme suyu örneğinde tespit edilemezken, çiğ nohut örneğinde 0.391 mg/kg olarak ölçülmüş, pişirilen nohut örneklerinde ise en düşük seviye 0,179±0,014 mg/kg ile eski teflon ekipmanda da pişirilip depolanmış örnekte, en yüksek seviye ise 20,5±2,0 mg/kg düzeyinde alüminyum tencerede pişirilen nohut örneğinde tespit edilmiştir. Son olarak Kurşun elementi, kontrol numuneleri dahil olmak üzere herhangi bir örnekte tespit edilememiştir. Kurşunun tespit edilememesi halk sağlığı bakımından uygun bulunmuştur.

Çizelge 5. Analiz Verilerine İlişkin Ortalama, Standart Sapma ve T Testi Değerleri*Table 5. Mean, Standard Deviation and T Test Values Regarding Analysis Data*

	Ortalama/Standart Sapma (\bar{x} / SS)								
	T değeri (mg/kg)								
	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Cd	Sn	Pb
Bakır tencere pişirme	174±2 t: 4,468	7,74±0,68 t: 2,905	47,5±3,1 t: 7,252	171±13 t: 17,93	5,19±0,36 t: 10,19	12,2±1,1 t: -0,091	0,015±0,004 t: -5,097	12,1±1,7 t: 5,089	t.e.
Bakır tencere depolama	124±19 t: 4,302	6,01±0,36 t: 4,302	30,1±1,3 t: 4,302	66,7±4,25 t: 4,302	3,38±0,29 t: 4,302	12,3±0,2 t: 4,302	0,026±0,003 t: 4,302	6,45±0,21 t: 4,302	t.e.
Alüminyum tencere pişirme	239±33 t: -10,5	9,55±1,65 t: -0,402	45,6±0,6 t: 12,33	108±11 t: -2,251	6,25±0,55 t: 3,241	12,1±0,3 t: -1,740	0,017±0,005 t: -2,983	20,5±2,0 t: 17,00	t.e.
Alüminyum tencere depolama	516±14 t: 4,302	10,2±2,4 t: 4,302	31,9±1,7 t: 4,302	118±9 t: 4,302	3,88±0,72 t: 4,302	12,6±0,6 t: 4,302	0,024±0,002 t: 4,302	0,518±0,03 t: 4,302	t.e.
Çelik tencere pişirme	165±13 t: 23,5	11,0±2,4 t: 2,117	44,3±3,9 t: 2,381	136±3 t: 5,878	6,09±0,46 t: 5,860	12,4±1,3 t: 0,084	0,011±0,007 t: -1,059	9,57±0,49 t: 31,89	t.e.
Çelik tencere depolama	62,1±6,2 t: 4,302	8,15±0,7 t: 4,302	33,3±4,1 t: 4,302	117±3 t: 4,302	3,45±0,46 t: 4,302	12,3±1,6 t: 4,302	0,022±0,01 t: 4,302	0,319±0,03 t: 4,302	t.e.
Yeni teflon pişirme	235±8 t: 40,8	10,5±1,9 t: 2,376	42,3±3,6 t: 3,603	103±13 t: -2,291	5,63±0,56 t: 8,538	12,0±1,8 t: -1,941	0,02±0,016 t: 0,435	1,20±0,23 t: 10,78	t.e.
Yeni teflon depolama	48,9±0,8 t: 4,302	8,97±0,88 t: 4,302	34,9±2,1 t: 4,302	122±10 t: 4,302	3,80±0,25 t: 4,302	13,5±1,1 t: 4,302	0,0±0,004 t: 4,302	0,287±0,02 t: 4,302	t.e.
Eski teflon pişirme	850±71 t: 19,9	9,17±0,08 t: 2,563	47,2±3,7 t: 14,24	100±8 t: 11,32	5,80±0,29 t: 20,84	12,6±0,2 t: 0,111	0,019±0,005 t: 0,843	1,47±0,15 t: 15,46	t.e.
Eski teflon depolama	27,5±5,6 t: 4,302	8,18±0,58 t: 4,302	33,1±2,6 t: 4,302	103±3 t: 4,302	3,50±0,09 t: 4,302	12,6±0,6 t: 4,302	0,016±0,002 t: 4,302	0,179±0,014 t: 4,302	t.e.

*Tüm sonuçlar %95 güven aralığında, ortalamalar için çift yönlü t testi uygulanmış ve ortalama ± standart sapma şeklinde verilmiştir (P<0,05).

** Verilen değerler üç tekrüre ait analiz değerlerinin aritmetik ortalamasıdır t.e.: tespit edilememiştir.

t: Deneysel hesaplanan t değeri

t: İstatistik t değeri.

Çizelge 5' de ICP-OES ile çalışmaya konu olan pişirme ekipmanlarının direkt ve depolama koşulu sonrası analiz sonuçları %95 güven seviyesinde, ortalama ± standart sapma ve istatistik olarak eşleştirilmiş t-testi uygulanarak aktarılmıştır. Çizelgede yer alan sonuçlar ışığında hesaplanan t (t deneysel) değeri, teorik t (t kritik) değerinden küçük olduğunda, sonuçlar arasında anlamlı bir fark olmadığı dolayısıyla da ekipman kaynaklı herhangi bir kontaminasyon gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Hesaplanan t değerinin, teorik t değerinden yüksek olduğu durumlarda ise pişirme ekipmanından ya da farklı şekillerde numuneye kontaminasyon meydana geldiği ve sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunduğu varsayılmaktadır. Bu doğrultuda Alüminyum verileri için pişirme ekipmanlarının direkt ve depolama koşulları mukayese edildiğinde deneysel olarak hesaplanan t değeri, teorik değerden büyük olduğundan sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunmaktadır. O halde bulgularda bahsedildiği şekilde metal kontaminasyonu meydana gelmiştir. Krom sonuçları incelendiğinde, pişirme materyallerinde direkt ve depolama sonrası ölçümlerde deneysel t değeri, teorik t değerinden küçük olduğundan Krom sonuçlarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Mangan, Demir ve Nikel elementleri için bakır tencere ve bakır tencere ile depolama koşulları sonuçlarında deneysel olarak hesaplanan t değeri teorik değerden büyük olduğundan dolayı, elde edilen sonuçlar arasında anlamlı bir fark vardır. Aynı zamanda Mangan

sonuçlarına bakıldığında alüminyum ve eski teflon ekipmanlarda yine $t_a > t_k$ olduğundan sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunduğu ve kontaminasyon gerçekleştiği söylenebilmektedir. Bakır ve Kadmiyum sonuçlarında ise yine tüm ekipmanlar için $t_a < t_k$ olduğundan pişirme materyallerinden herhangi bir bulaş gerçekleşmediği ve sonuçlar arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Kalay elementi çoğu metal alaşımının üretiminde kullanıldığından dolayı tüm sonuçlarda $t_a > t_k$ şeklindedir ve pişirme materyali kaynaklı metal geçişinin olduğu istatistiksel olarak da anlaşılmaktadır. Nikel; bakır, çelik ve teflon ekipmanlarda kullanıldığından bu ekipmanlar için elde edilen sonuçlara $t_a > t_k$ şeklindedir. Ve görüldüğü üzere nikel için elde edilen bulgularda anlamlı bir fark var olduğu ortaya koyulmuştur.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Çalışmadan elde edilen veriler incelendiğinde ekipman kaynaklı bulaşmanın Alüminyum elementi için diğer elementlere kıyasla daha yüksek oranda olduğu açıkça görülmektedir. Konuyla ilişkili olarak Ojezele, Ojezele ve Adeosun (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada demir, eski paslanmaz çelik, yeni paslanmaz çelik, eski alüminyum, yeni alüminyum ve kil kaplarda pişirdikleri pirinç örneğinde çeşitli ağır metal (Fe, Zn, Cd, Ni, Mn, Cr, Co, Pb, Cu ve Al) seviyelerini inceleyip, sonuçta Alüminyum için kontrol örneklerinde konsantrasyonu 0.01 ± 0.01 ve 0.02 ± 0.01 mg/kg olarak tespit ederken, en yüksek kontaminasyonu yeni Alüminyum kapta pişen pirinçte (440 ± 60 mg/kg), en düşük kontaminasyonu ise eski toprak kapta pişen pirinçte (132 ± 24 mg/kg) tespit etmişlerdir. Bu çalışmada Alüminyum kapta pişen nohut örneği için elde edilen sonuç 239 ± 33 mg/kg olarak ölçülmüştür. Ojezele, Ojezele ve Adeosun (2016)' un elde ettikleri sonuçlar Alüminyum için bu çalışma sonuçlarından oldukça yüksek seviyededir. Bu noktada alüminyum ekipmanın ham madde orjinli olarak geçişi arttırdığı anlaşılmaktadır. Dabonne ve ark. (2010) ise yapmış oldukları çalışmada geleneksel Alüminyum tencerede pişirilen pirincin alüminyum miktarının $1,6$ mg/g'dan, $18,1$ mg/g'a çıktığını tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen bu çalışmada da Alüminyum ekipmanda pişirilen örnekte bir hayli yüksek seviyede (239 ± 33) ham madde kaynaklı bir geçiş olduğu anlaşılmaktadır. Güneş (2001) yapmış olduğu çalışmada Alüminyum kaplarda pişirilen yiyeceğin Alüminyum içeriğini ilk yemek için 11.0 ± 0.56 ppm, ikinci yemek için 20.0 ± 1.14 ppm olarak tespit etmiştir. Yeni Alüminyum kaplarda pişirilen yiyecekler için ise sonuçlar $3,5 \pm 0,08$ ve $8,0 \pm 0,18$ ppm şeklinde bulunmuştur. Bu sonuçların çalışmada alüminyum, çelik ve bakır ekipmanlardan pişirme ve depolama koşulu ile elde edilen sonuçlara kıyasla oldukça düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Mevcut sonuçlar depolama koşulu yönünden ele alındığında ise alüminyum ekipmanlarda depolama ile birlikte örneğe geçen Alüminyum miktarının pişirmeye oranla daha da yükseldiği (516 ± 14 ppm) gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise Alüminyumun pişirme ekipmanlarında doğrudan ham madde olarak kullanılmasıdır. Alüminyum dışındaki diğer ekipmanlarda ise depolama koşulu ile geçebilecek olan ağır metal içeriklerinde azalmalar görülmüştür. Bu durum özetle, ekipmanların Alüminyum dışındaki elementleri yapısal olarak adsorbe ettiği anlamını taşımaktadır.

Weidenhamer ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada Alüminyum kaplarda pişirilen asitli yiyeceklerde Kurşun, Kadmiyum, Alüminyum ve Mangan oranlarında önemli artışlar olduğunu ortaya koymuşlardır. Bunun yanında pişirme süresi ve yiyeceğin pişirildiği ekipmanda yemeğin bekletilme süresinin, ağır metal geçişini etkileyen en önemli faktör olduğunu da vurgulamışlardır. Çalışmadan elde edilen bulgular ise Alüminyum için 174 mg/kg, Kadmiyum için 1.4 µg ve Mangan için 248 µg şeklindedir. Çalışmadaki Alüminyum verilerinin bu çalışma ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Yine analiz verileri incelendiğinde Demir sonuçlarının diğer elementlere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ekipmanlar içerisinde en yüksek Demir geçişinin bakır ekipmanla pişirme ile gerçekleştiği görülmüştür (171 ± 13 mg/kg). Bunu takiben ikinci en yüksek geçiş ise çelik tencere ile pişirme işleminde meydana gelmiştir (136 ± 3 mg/kg). Diğer elementler için migrasyon sonuçları incelendiğinde geçişlerin birbiriyle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle yeni ve eski teflon ekipmanlarla yapılan pişirme işlemindeki Kalay seviyesinin diğer pişirme verilerine kıyasla oldukça az seviyelerde olduğu tespit edilirken; yeni teflon ekipman için Kalay düzeyi $1,20 \pm 0,23$ mg/kg iken, eski teflon ekipman için Kalay düzeyi $1,47 \pm 0,15$ mg/kg şeklindedir.

Kamerud, Hobbie ve Anderson (2013) çalışmalarında çelik ekipmanlarda asit ihtiva eden gıdalar pişirildiğinde ya da bekletildiğinde, pişirme ve bekletme süresine bağlı olarak gıda maddelerine Nikel ve Krom kontaminasyonunun olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışma sonucunda Nikel geçişi ortalama 88 µg iken, Krom geçişi 86 µg şeklinde gerçekleşmiştir.

Flint ve Packirisamy (1995) çalışmalarında çelik tencerelerde asitli gıdaların pişirilmesinin Nikel geçişine büyük oranda katkıda bulunacağını belirtmişlerdir. Çalışmada çelik kaplarda kuzukulağı kavurması, kayısı marmeladı, limon marmeladı, yeşil domates turşusu kavurması ve patates kavurması gibi asitli yiyecekler pişirilmiştir. Yiyeceklerin ortalama Nikel içerikleri sırasıyla 40±10 mg/kg, 120±10 mg/kg, 80±20 mg/kg, 30±10 mg/kg ve 10±10 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Bulunan sonuçlar yapılan bu çalışmanın bulgularına göre bir hayli yüksektir. Bu çalışmada çelik tencereden nohut numunesine geçen Nikel miktarı 6,09±0,46 mg/kg şeklindeyken, bu oran depolama faktöründe 3,45±0,46 mg/kg'a düşmüştür. Bu düşüşün sebebi depolama ile çelik materyalin Nikel elementini adsorbe etmesi olarak açıklanmaktadır. Flint ve Packirisamy (1995)'ın yapmış oldukları çalışmadaki sonuçların yüksek olmasındaki temel sebep kullanılan yiyecek maddelerinin yüksek asiditeye sahip yiyecekler olması söylenebilir.

Ogidi, Sridhar ve Coker (2017) yapmış oldukları çalışmada ekipmanların pişirme işlemi sırasında bazı eser metalleri yiyeceklere bulaştırabileceğini ve bu bulaşmanın gıdalardaki mevcut ağır metal konsantrasyonlarında hafif de olsa bir artışa sebep olabileceğini iletmişlerdir. Çalışmada incelenen ağır metaller içerisinde Kurşun, Nikel, Çinko seviyelerinin güvenilir sınırlar içerisinde olduğu, Alüminyum, Demir ve Krom seviyelerinin ise yasal olarak kabul edilebilir limitin üzerinde olduğu saptanmıştır. Ogidi, Sridhar ve Coker'in çalışma sonuçları Alüminyum dışındaki elementler için yapılan bu çalışmanın verileriyle uyum içerisinde.

Çalışmada kullanılan bütün ekipmanlar ele alındığında numuneye Kurşun elementi geçişi gerçekleşmemiştir. Kadmiyum elementine ilişkin değerler ise yasal limitlerin oldukça altındadır. En toksik ağır metallerden olan Kurşun ve Kadmiyum elementi insan sağlığı için oldukça tehlikelidir ve vücuda az miktarda bulaşma ile dahi zamanla ciddi sağlık sorunlarına sebebiyet verebilmektedir. Elde edilen veriler ışığında Alüminyum ekipmana ilişkin bulgular incelendiğinde özellikle Alüminyum ve Demir migrasyonunun yasal limitlere kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Çelik ekipmanın Kadmiyum, Krom ve Bakır içeriklerinin de yine aynı şekilde özellikle de Krom ve Bakır yönünden yasal limitlerden yüksek olduğu görülmektedir. Krom, çelik ekipman yapımında kullanılan bir element olduğu için bu şekilde bir migrasyonun olması beklendik bir durumdur.

FİNANSAL DESTEK (FINANCIAL SUPPORT)

Bu çalışma Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından 171322002 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Prof. Dr. Hatice Ferhan NİZAMLIOĞLU danışmanlığında "Pişirme Ekipmanlarından Gıdaya Ağır Metal Geçişinin Belirlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akıncı, A., Akbulut, H. & Yılmaz, F (2003). Floropolimer (Teflon) kaplamaların yapı ve özellikleri", *UCTEA J. Chamb. Metall. Mater. Eng.*, 133, 53-59.
- Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., & Mittal, N. (2008). Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food Chemistry*, 111, 811-815. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.04.049.
- Baş, M. (2004). Besin hijyeni güvenliği ve HACCP. Sim Matbaacılık, Ankara.
- Biricik, G., Çöplü, N., & Dağdelen, A. F. (2015). Gıda ile temas eden madde ve malzemelerden gıdaya geçebilecek Alüminyum miktarı ve bunun riskleri. *Gıda ve Yem Bilimi-Teknolojisi Dergisi*, 15, 1-8.

- Chehregani, A., & Behrouz, E. M. (2007). Removal of heavy metals by native accumulator plants. *International Journal of Agriculture & Biology*, 9(3), 462-465.
- Dabonne, S., Koffi, B. P., Kouadio, E. J. P., Koffi, E. A., & Kouame, L. P. (2010). Traditional utensils: potential sources of poisoning by metals. *British Journal of Pharmacology and Toxicology*, 1(2), 90-92.
- Dağ, A. (2006). Yiyecek içecek işletmelerinde standart tarifeler maliyet ve hijyen kontrolü. Meteksan Matbaacılık, Ankara.
- Eraslan, N. (2013). Pişirme yöntemleri. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Flint, G. N., & Packirisamy, S. (1995). Systemic nickel: the contribution made by stainless-steel cooking utensils. *Contact Dermatitis*, 32, 218-224.
- Gisslen, W. (2011). Professional cooking. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Güneş, M. (2011). *Alüminyum Kaplardan Yemeklere ve Diğer Yiyeceklere Geçen Alüminyum Miktarının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Kamerud, K. L., Kevin, A. H., & Kim, A. D. (2013). Stainless steel leaches nickel and chromium into foods during cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(39), 9495-9501. DOI:10.1021/jf402400v.
- Karcık, H. (2017). *Çeşitli Organik Kuruyemişlerin Ağır Metal İçeriklerine Yönelik Bir Araştırma*. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Leblebici, Z., & Aksoy, A. (2008). Kayseri civarında satılan bazı kuruyemişlerin ağır metal miktarlarının karşılaştırılması. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(1), 5-9.
- McGee H (2004). On food and cooking. Scribner, New York.
- Naseri, M., Rahmanikhah, Z., Beiygloo, V., & Ranjbar, S. (2014). Effects of two cooking methods on the concentrations of some heavy metals (cadmium, lead, chromium, nickel and cobalt) in some rice brands available in Iranian market. *Journal of Chemical Health Risks*, 4(2), 65-72. DOI:10.22034/JCHR.2018.544068.
- Ogidi, M., Sridhar, M. K. C., & Coker, A. O. (2017). A follow-up study health risk assessment of heavy metal leachability from household cookwares. *Journal of Food Science and Toxicology*, 1(3), 1-9.
- Ojezele, O. J., Ojezele, M. O., & Adeosun, A. M. (2016). Cooking utensils as probable source of heavy metal toxicity. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 24(7), 2216-2220. DOI:10.5829/idosi.mejsr.2016.24.07.23516.
- Radwan, M.A., & Kalama, A. S. (2006). Market basket survey for some heavy metals in egyptian fruits and vegetables. *Food and Chemical Toxicology*, 44, 1273-1278. DOI: 10.1016/j.fct.2006.02.004.
- Uddin, M. K. (2016). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438-462. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.02.
- Uriah, L., Dungrit, C., & Rhoda, G. (2014). Locally made utensils as potential sources of heavy metals contamination of water: A case study of some pots made in Nigeria. *American Journal of Environmental Protection*, 3(6-2), 35-41. DOI: 10.11648/j.ajep.s.2014030602.16.
- Weidenhamer, J. D., Kobunski, P. A., Kuepouo, G., Corbin, R. W., & Gottessfeld, P. (2014). Lead exposure from aluminum cookware in Cameroon. *Science of the Total Environment*, 496, 339-347. DOI:10.1016/j.scitotenv.2014.07.016.
- Zukowska, J., & Biziuk, M. (2008). Methodological evaluation of method for dietary heavy metal intake. *Journal of Food Science*, 73 (2), 21-29. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2007.00648. x.



EFFECTS OF CALCINATION TEMPERATURE ON HYDROTHERMALLY SYNTHESIZED TITANIUM DIOXIDE SUBMICRON POWDERS

¹Büşra BULUT , ²Şeyma DUMAN 

^{1,2}Bursa Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Metallurgical and Materials
Engineering Department, Bursa, TURKEY

²Bursa Technical University, Central Research Laboratory, Bursa, TURKEY

¹mbusrabulut@gmail.com, ²seyma.duman@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 13.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 30.06.2021)

ABSTRACT: This study examines the synthesis procedure of titanium dioxide (TiO₂) submicron powders from titanium (IV) isopropoxide initial by combining the hydrothermal method and subsequent calcination. Various calcination temperatures changing from 200 °C to 800 °C were applied after hydrothermal synthesis to understand the effects on the crystalline phase, particle size, and morphology of the powders. Following the calcination procedure, the properties of synthesized powders were assessed by using different characterization techniques. According to the results of morphological analysis, the crystalline structure of submicron powders was affected by increasing calcination temperature. Anatase and rutile phases of TiO₂ submicron powders displayed unimodal particle size distribution, respectively. Furthermore, the particle sizes of synthesized TiO₂ submicron powders decreased by the increasing calcination temperature, while the crystallite sizes increased. The results of phase analysis revealed that TiO₂ submicron powders have tetragonal structure anatase and rutile phase. In particular, anatase to rutile phase transformation was carried out at low temperatures.

Key Words: Titanium dioxide, Hydrothermal synthesis, Calcination temperature, Crystalline phase

Hidrotermal Olarak Sentezlenen Titanyum Dioksit Mikronaltı Tozları Üzerine Kalsinasyon Sıcaklığının Etkileri

ÖZ: Bu çalışma, titanyum dioksit (TiO₂) mikronaltı tozların titanyum tetraizopropoksit başlangıç malzemesinden, hidrotermal yöntem ve ardından yapılan kalsinasyon ile sentezlenme prosedürünü incelemektedir. Hidrotermal sentez sonrası yapılan kalsinasyon işleminin, 200 °C 'den 800 °C'ye kadar değişen sıcaklıklarda uygulanması ile, bu sıcaklıkların elde edilen tozların kristal fazı, morfolojisi ve partikül boyutu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kalsinasyon işlemi takiben, elde edilen tozlar çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Morfolojik analiz sonuçlarına göre mikronaltı tozların kristal yapısı artan kalsinasyon sıcaklığından etkilenmiştir. Anataz ve rutil faza sahip TiO₂ mikronaltı tozlar, sırasıyla iki modlu ve tek modlu partikül boyut dağılımı göstermişlerdir. Ayrıca, kalsinasyon sıcaklığı arttıkça sentezlenen mikronaltı tozların partikül boyutları azalırken, kristalit boyutları artmıştır. Faz analizi sonuçları, tetragonal yapıda anataz ve rutil faza sahip TiO₂ mikronaltı tozları ortaya çıkarmıştır. Özellikle, anatazdan rutil faza dönüşüm düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titanyum dioksit, Hidrotermal Sentez, Kalsinasyon sıcaklığı, Kristalin faz

1. INTRODUCTION

Over the past decades, submicron-structured TiO₂ has been the most widely investigated semiconducting metal oxide owing to peerless chemical and physical properties (Corradi et al., 2005; Tan et al., 2015; Wu et al., 2015). Moreover, it possesses numerous potential application fields including photocatalysis (Pelizzetti and Minero, 1993; Rao and Dube, 1996; Hashimoto et al., 2005), gas sensor (Zheng et al., 2000; Bankstein and Semancik, 2006), pigments (Hird, 1976), photovoltaics and electrochromic (Chen and Mao, 2007) which required for specific crystalline phase, particle size and particle shape (Corradi et al., 2005). The TiO₂ has three different crystalline phases as anatase, rutile, and brookite. Each crystalline phases have different bandgaps due to consists of different oriented TiO₆ octahedral chains (Tomić et al., 2015; Li et al., 2008). While the most common phase of TiO₂, anatase generally used for photocatalytic purposes (Tomić et al., 2015; Manjunath et al., 2018), the rutile phase is used to improve mechanical properties in load-bearing applications (Feng et al., 2015). These crystalline phases of TiO₂ can be strongly affected by experimental parameters and the preparation methods.

Recently TiO₂ submicron-structures produced by diverse synthesis techniques such as sol-gel route (Bankstein and Semancik, 2006), hydrolysis (Chen et al., 2003), hydrothermal method (Yang et al., 2001; Andersson et al., 2002; Chae et al., 2003; Cano-Casanova et al., 2018), flame synthesis (McCormick et al., 2004), and chemical vapor deposition (Ayllon et al., 1999) using different raw materials. Among them, the hydrothermal method is an effective way to prepare well-crystallized TiO₂ submicron particles (Tomić ve dić, 2015). For instance, Yang et al. studied the synthesis of highly crystallized anatase TiO₂ submicron powders by hydrothermal approach from peptized tetraalkylammonium hydroxide sols. Chae et al. demonstrated how to obtain TiO₂ submicron particles having a specific particle size and crystallization by controlling the Ti precursor and solvent system during hydrothermal synthesis. Cano-Casanova et al. documented the synthesis of highly crystallized TiO₂ submicron powders with small crystal size when the change of HCl concentration. The original aspect of this study is the study of the recently synthesized TiO₂ submicron powders at the lowest temperature for the powder metallurgy applications.

In this paper, TiO₂ submicron powders were obtained by the hydrothermal method and subsequent heat treatment. A variety of temperatures (200 °C - 800 °C in) were applied to the submicron powders in order to reveal the crystalline formation and calcination temperature relation of TiO₂. The characterization of synthesized submicron powders was conducted using by X-ray diffractometer (XRD), a scanning electron microscope coupled with energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS), and a particle size distribution analyzer (Nano-PSD). Phase transformation temperatures of anatase to rutile were discussed in detail.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Raw Materials and Powder Synthesis

Titanium (IV) isopropoxide (TTIP, C₁₂H₂₈O₄Ti, Alfa Aesar™) as the source of TiO₂ and urea (CH₄N₂O, Merk™) as the catalyst were used as raw materials. Firstly, 5 g of urea was added to 200 mL of purified water under magnetic stirring (Stuart™ UC152D). 50 mL of TTIP was slowly dripped into solution A and stirred vigorously for one h to mix homogeneously. Subsequently, the mixture was transferred into 200 mL Teflon autoclave reactors and kept at 100 °C for 24 hours in an oven (Ecozell™). After the hydrothermal treatment, autoclaves were taken from the oven left to cool for a while at room temperature. By centrifugally (Hettich™ Universal 320/320R) separated the solid structure, which partially settled in the bottom of cooled autoclaves from the suspension form. The homogeneous precipitates formed in the reactors were washed several times with acetone and distilled water, respectively. By washing with pure water, it was ensured that waste anionic impurities were removed from the wet powder surface and particle size differences were prevented. The hydrothermally treated powders were dried at 90 °C for 12 hours. Finally, the powders were calcined using a chamber-type laboratory furnace (Protherm™ PLF 160/7). The calcination temperature was applied as 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 700 °C, and 800 °C for 4h

with a heating of 5 °C/min in an air atmosphere. The calcinated powders were designated as T200, T300, T400, T500, T700, and T800, respectively. The experimental details were illustrated in Figure 1.

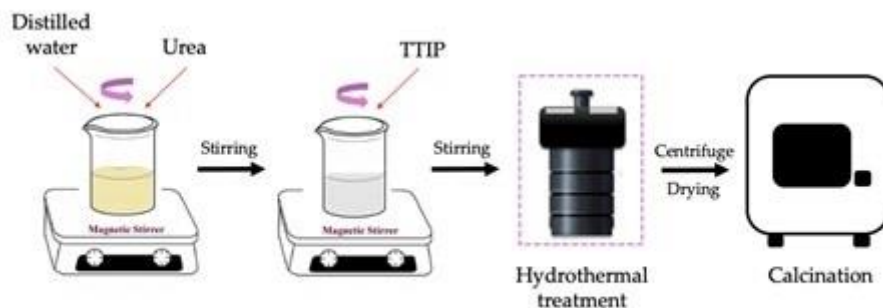


Figure 1. The illustration of experimental set-up.

2.2. Characterization

The morphological features of the hydrothermally treated and calcinated submicron powders were investigated by a Carl Zeiss™/Gemini 300 scanning electron microscope (SEM) coupled with an energy-dispersive X-ray spectrometer (EDS). The microscope operated at an accelerating voltage of 20 kV. The structural identification of the phases formed was recorded using a Bruker™ Discovery X-ray diffractometer (XRD) with $\text{CuK}\alpha$ (0.154 nm) radiation for 2θ values from 20° to 80° with a step size of 5°/min. The diffractometer operation conditions were 40 kV and 40 mA. The average particle size of the synthesized submicron powders was analyzed using a Malvern™ Mastersizer 3000 particle size analyzer (PSA).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The morphological differences in TiO_2 submicron powders were investigated based on the calcination temperatures. The SEM images in Figure 2 show the TiO_2 submicron powders after calcination at different temperatures having irregular clusters with a diameter around 300 nm. Although the SEM images of particles revealed similar morphologies, the aggregation amounts of particles were enhanced with increasing calcination temperatures. This is particularly more clear in the images of the rutile phase of TiO_2 submicron powders calcinated at 400 °C (Figure 2 (c)). Moreover, it was observed that agglomeration could not be prevented in powders synthesized by the hydrothermal method. Our findings are compatible with the outcomes of a study conducted by Ding et al. (2010). In basically, they showed that no control of shape and size on phase-pure rutile submicron powders was available. As in the literature (Ding et al., 2010; Mioduska et al., 2016; Phromma et al., 2020), calcination temperature on the morphological and particle size of TiO_2 submicron powders has played a crucial role in this study. The EDS results show the presence of Ti and O atoms in the structure and no impurities have been observed.

Table 1. Physical properties of the synthesized TiO₂ submicron powders.

Sample	Particle Size (nm)	Specific surface area (m ² /g)	True Density (g/cm ³)
T200	560.0	18.5	3.58±0.05
T300	200.0	26.4	3.89±0.06
T400	188.7	30.8	4.17±0.02
T500	235.4	21.6	4.19±0.05
T700	247.9	19.7	4.21±0.09
T800	254.2	18.9	4.22±0.01

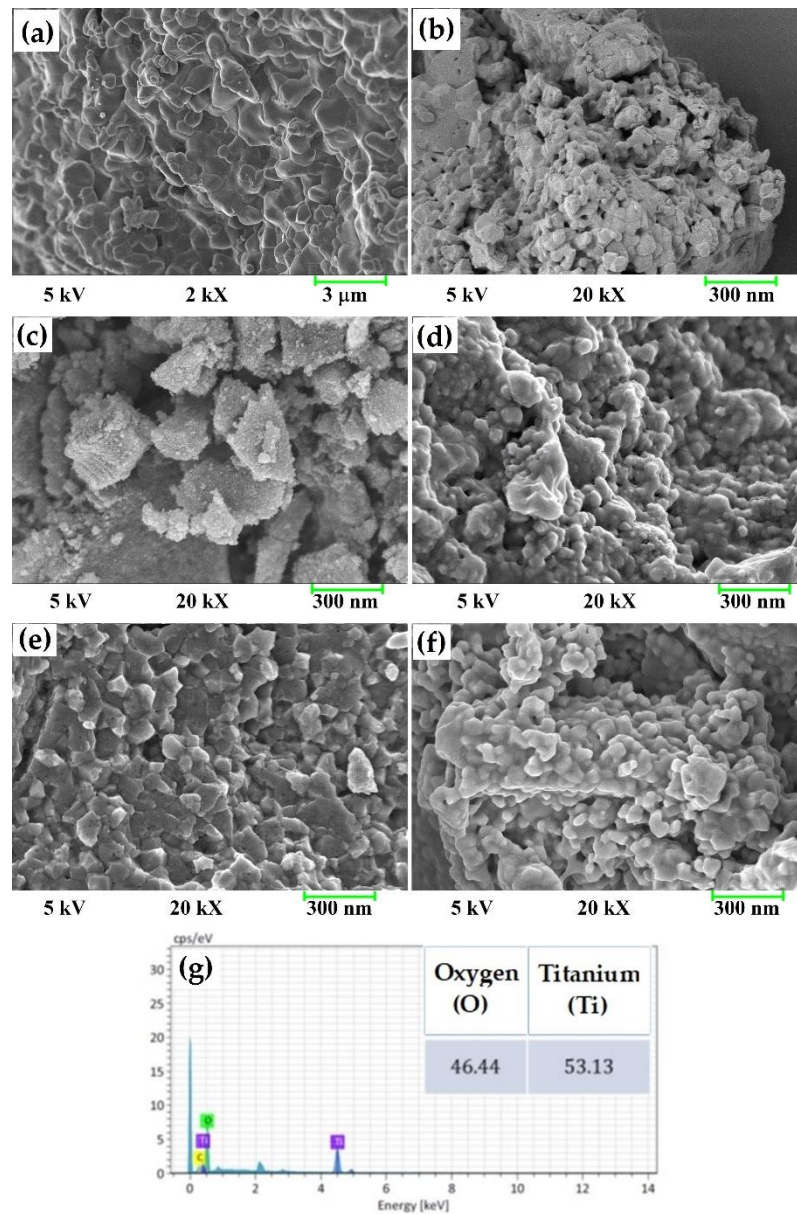
**Figure 2.** SEM images taken from the synthesized TiO₂ submicron powders: a) T200, (b) T300, (c) T400, (d) T500, (e) T700, (f) T800 and (g) T300-EDS.

Table 1 summarizes the physical properties of the powders. The theoretical density of TiO₂ is 4.23 g/cm³. The particle sizes of TiO₂ submicron powders synthesized at different temperatures were between

the range of 200 – 510 nm, while the specific surface areas (BET) of them are 18.5 – 30.8 m²/g. Particle size distributions (PSDs) of TiO₂ submicron powders were shown in Figure 3. T200 sample had an average size of 560 nm (Figure 3a). Otherwise, T400 and T800 samples displayed a unimodal PSD. During the phase transformation from anatase to rutile, while the particle size of the powders decreased, the particle size of the powders increased in proportion to the calcination temperature in rutile form. It is clear that the anatase to rutile phase transformation caused a degradation in the particle sizes of synthesized powders. In addition, the rate of this transformation enhanced with increasing calcination temperature in the rutile form of TiO₂. Moreover, the particle sizes of calcinated powders were increased which is supported by the BET results regarding their surface area decreasing from 30.08 to 18.9 m²/g. Compare to previous studies, TiO₂ submicron powders are obtained at lower temperature (Chen et al., 2003; Li et al., 2008; Cano-Casanova et al., 2018). The pycnometer density of the synthesized TiO₂ submicron powders was given in Table 1. When TiO₂ submicron powders were synthesized by at 400 °C, pycnometer density values increased. And also, they have gotten closer to theoretical density, which is 4.23 g/cm³.

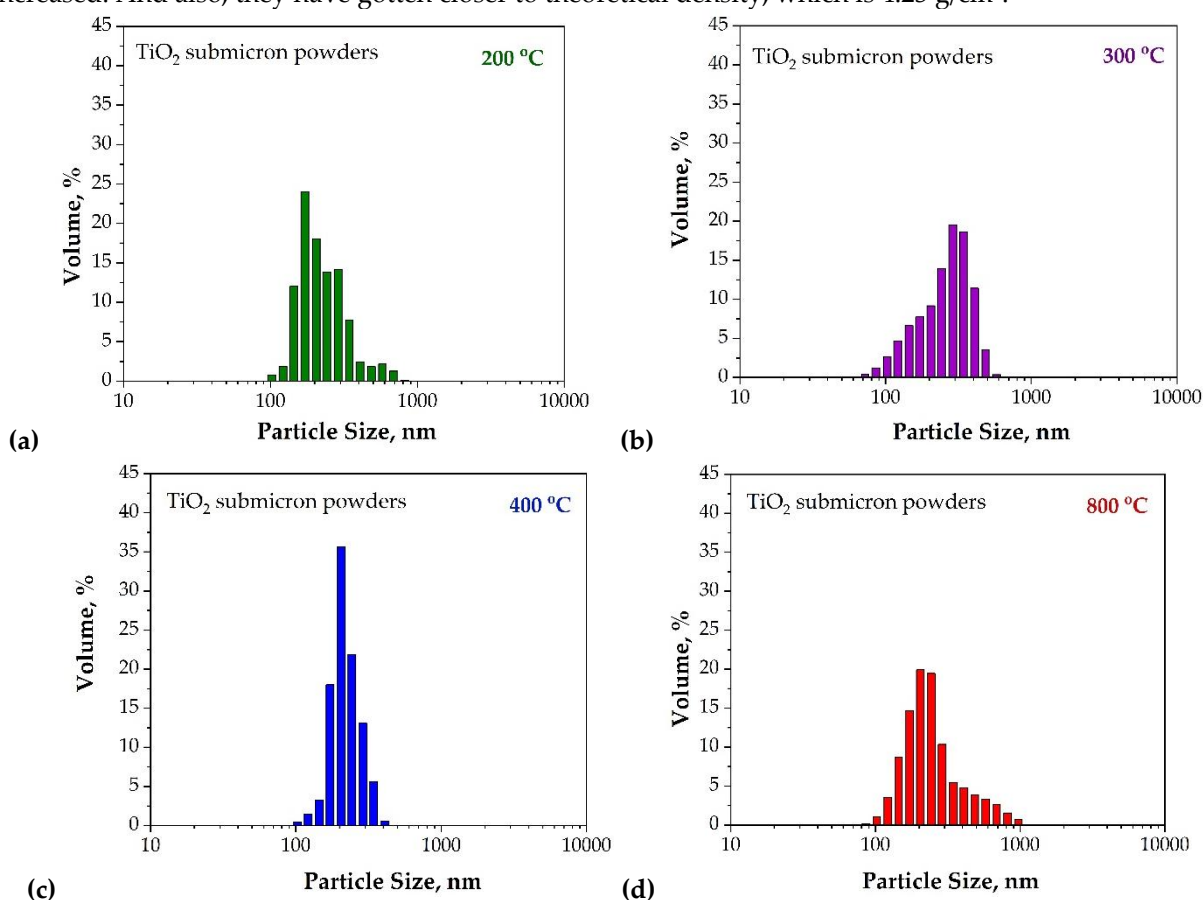


Figure 3. Particle size distributions of TiO₂ submicron powders: (a) 200 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C, and (d) 800 °C.

Figure 4. shows the XRD patterns of calcinated submicron powders at different temperatures in the range of 200 – 800 °C. As seen in the XRD patterns in Figure 4a, the dominant peaks of anatase were detected at 2θ values of 25.3° (101), 54.5° (105), 48.0° (200), 37.8° (004), 55.0° (211), 62.7° (204), 68.9° (116), and 70.3° (220), while the peaks located at 25.7° (111), 25.3° (120) and 30.8° (121) corresponded to brookite in accordance with Powder Diffraction Standard (JCPDS card no. 00-064-0863) (Li et al., 2008; Cano-Casanova et al., 2018). The anatase form of TiO₂ has a tetragonal structure, whereas the brookite phase is an orthorhombic structure. The patterns of TiO₂ submicron powders synthesized in the range of 400–800 °C only show the existence of pure TiO₂ with a rutile-crystal structure, which is compatible with the standard data from the JCPDS PDF card 01-086-0148. The rutile TiO₂ phase is also a tetragonal structure comprising of the characteristic peaks at $2\theta = 27.4^\circ, 36.1^\circ, 41.2^\circ, 54.3^\circ, 56.6^\circ$ and 69.0° corresponding to

(110), (101), (111), (211), (220) and (301) planes, respectively. The anatase phase of TiO_2 started to form at the calcination temperature of 200 °C. The transformation of anatase to rutile phase was completed after calcination at 400 °C, and an additional phase was not observed. It was observed that XRD peaks were sharper and narrower when the calcination temperature of TiO_2 was increased. In addition, the increased crystallinity of TiO_2 was associated with increasing the calcination temperature to 400 °C and above. This result is lower than that reported by Chen et al. (2003) at 250 °C and 600 °C, respectively. It is seen in Figure 4c, the calcination temperatures play a significant role in the change of the crystalline phase. Our findings have coherency with the results of a study reported by Phromma et al. (2020). An important result of their study was proving that the necessity of a high calcination temperature in the transformation process of anatase into the rutile phase. Although many studies have been published about hydrothermally synthesized TiO_2 , it has not been reported to the occurrence of the anatase formation at a low temperature as 200 °C, and also the anatase phase transform to the rutile at 400 °C. Although many studies have been published about hydrothermally synthesized TiO_2 , it has not been previously reported to the occurrence of the anatase formation at a low temperature as 200 °C, and also the anatase phase transform to the rutile at 400 °C. By this aspect, the synthesis of the pure TiO_2 phase at lower temperature is an original study.

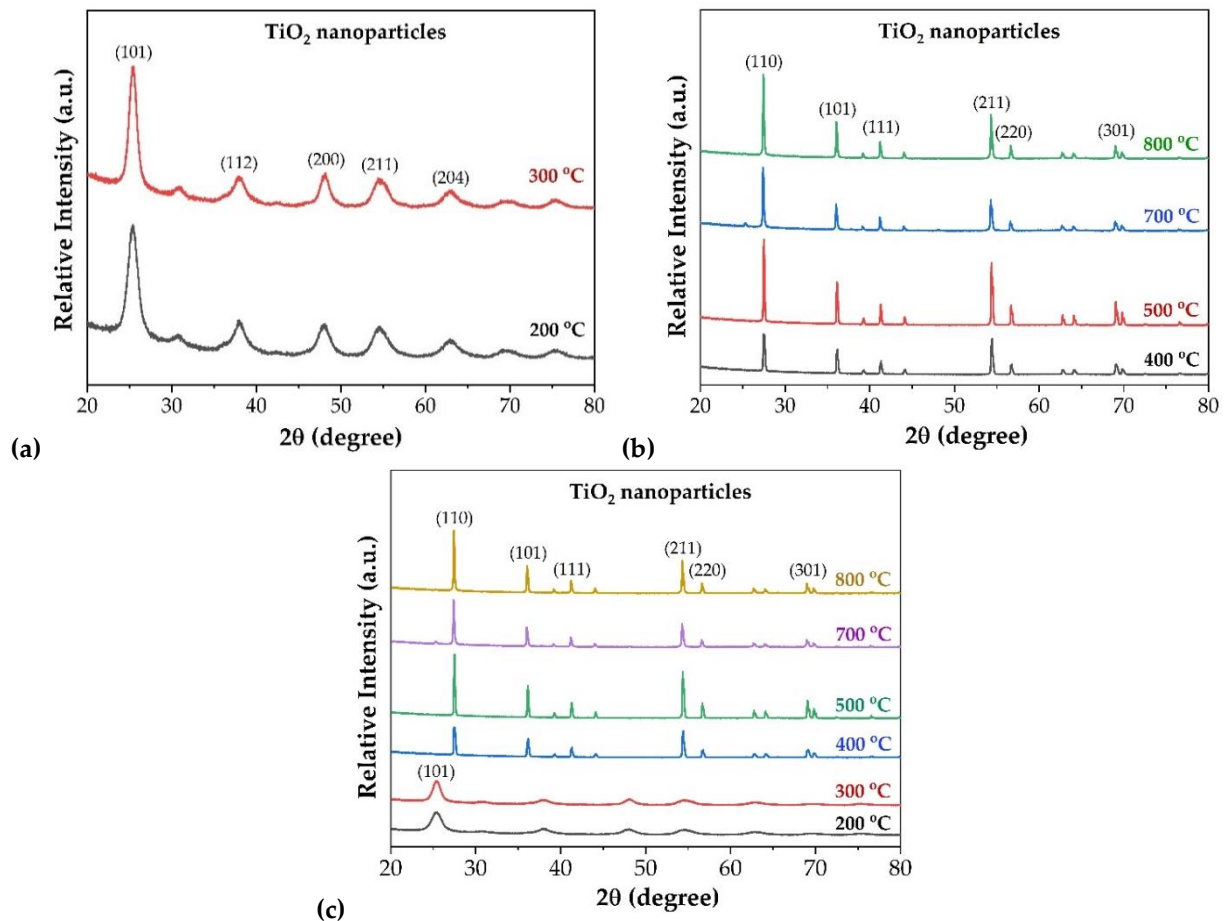


Figure 4. XRD patterns of the synthesized submicron powders: (a) TiO_2 in anatase phase, (b) TiO_2 in rutile phase, and (c) TiO_2 submicron powders (taken collectively).

The average crystallite sizes (D) of TiO_2 submicron powders were determined using the full width at half maximum (FWHM) of their XRD peaks according to Debye-Scherrer's equation (Duman et al. 2020; Venkateswarlu et al. 2010; Cheong et al. 2013):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

where β is the corrected half-peak width of the experimental sample (FWHM), θ is Bragg angle, λ is the X-ray wavelength (0.15406 nm for CuK α radiation), and K is the shape factor (approximately equal to 0.89).

XRD results of the TiO₂ submicron powders were given in Table 2. The XRD patterns of TiO₂ submicron powders synthesized at 200 and 300 °C changed in comparison TiO₂ submicron powders synthesized at higher calcination temperatures. In Table 2, the mean crystalline size of the TiO₂ submicron powders is in the range of 16.8 – 60.7 nm. Furthermore, the crystallite sizes of all phases increased at temperatures ranging from 200 °C to 800 °C as presented in Table 2. Table 2 indicated the improvement in the crystallization of TiO₂ submicron powders. This study revealed that calcination temperature affected phase transformation, crystallite size, and crystallinity of TiO₂ submicron powders. The crystallite size and particle size of a single-crystal nanoparticle are the same (Nalwa, 2000). Synthesized TiO₂ submicron powders have polycrystalline or single crystalline structures depending on synthesis process conditions. Therefore, particle size values of TiO₂ submicron powders are corresponding a different inference than crystallite size values.

Table 2. XRD results of TiO₂ submicron powders.

Temperature (°C)	2 θ (°C)	D(nm)	Lattice parameters	
			a (nm)	c (nm)
200	25.3 (101)	16.8	0.3785	0.9494
300	25.3 (101)	17.4	0.3785	0.9494
400	27.4 (110)	30.8	0.3251	0.5209
500	27.4 (110)	49.3	0.3252	0.5209
700	27.4 (110)	60.7	0.4594	0.2959
800	27.4 (110)	54.9	0.4592	0.2957

The percentage of crystallinity ($X_c\%$) was predicted using the equation below (Tatar et al. 2016):

$$X_c\% = \frac{\Sigma A_c}{\Sigma A_c + \Sigma A_a} \times 100 \quad (2)$$

ΣA_c is the total area under crystal peaks, and ΣA_a is the total area under amorphous peaks.

The crystallinity results given in Figure 5 indicated that TiO₂ submicron powders calcinated at 200°C involve crystalline phase content (78%) with respect to amorphous phase content (22%). More increase of temperature (from 200 to 800°C) in the calcination method demonstrates the decrease in the amount of amorphous phase (6%) and increase in the amount of crystalline phase (94%) in the TiO₂ submicron powders. Hence, it may be interpreted as the increase in the crystal phase rate of TiO₂ submicron powders is strongly related to the calcination temperature.

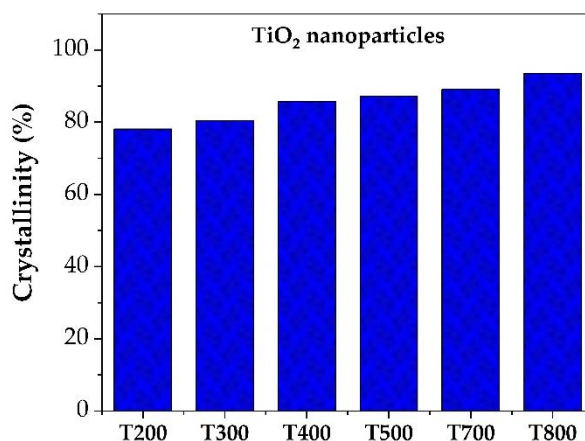


Figure 5. The calculated values of the phase crystallinity TiO_2 submicron powders.

Consequently, the hydrothermal and calcination dual methods provided the synthesis of pure TiO_2 submicron powders. The calcination temperature has a significant effect on the crystalline phases and crystallinities of synthesized submicron powders. The utilized process could be a promising novel material synthesis method for submicron-scale materials.

4. CONCLUSIONS

In this study, TiO_2 submicron powders were successfully produced by the combination of hydrothermal synthesis and calcination. The effects of calcination temperatures ranging from 200 °C to 800 °C were detailly investigated. According to the obtained results, the following conclusions can be summarized as:

1. Morphological characterizations revealed that TiO_2 submicron powders have irregularly shaped clusters. Besides, the changing calcination temperatures affected the crystalline structure of the powders.
2. The particle size values of the TiO_2 submicron powders synthesized at different temperatures were between the range of 200 – 510 nm, while the specific surface area (BET) values were between 18.5 – 30.8 m^2/g .
3. According to phase analysis results, anatase and rutile TiO_2 submicron powders were synthesized at low temperatures. Furthermore, the crystallite size of the analyzed samples increased with heightening calcination temperatures.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported financially by Bursa Technical University Scientific Research Projects (project no. 190Y017). The authors thank Bursa Technical University Central Research Laboratory for providing laboratory facilities for this research.

REFERENCES

- Andersson, M., Österlund, L., Ljungstroem, S., Palmqvist, A., 2002, "Preparation of nanosize anatase and rutile TiO_2 by hydrothermal treatment of microemulsions and their activity for photocatalytic wet oxidation of phenol", *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(41), p. 10674-10679.
- Ayllon, J., Figueras, A., Garelik, S., Spirkova, L., Durand, J., Cot, L., 1999, "Preparation of TiO_2 powder using titanium tetraisopropoxide decomposition in a plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) reactor", *Journal of Materials Science Letters*, 1999. 18(16): p. 1319-1321.
- Benkstein, K.D., Semancik, S., 2006, "Mesoporous nanoparticle TiO_2 thin films for conductometric gas sensing on microhotplate platforms", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(1): p. 445-453.

- Chae, S. Y., Park, M. K., Lee, S. K., Kim, T. Y., Kim, S. K., Lee, W. I., 2003, "Preparation of size controlled TiO₂ nanoparticles and derivation of optically transparent photocatalytic films", *Chemistry of Materials*, 15(17),): p. 445-453.
- Chen, Y.-F., Lee, C. Y., Yeng, M. Y., & Chiu, H. T., 2003, "The effect of calcination temperature on the crystallinity of TiO₂ nanopowders", *Journal of Crystal Growth*, 247(3-4): p. 363-370.
- Chen, X., Mao, S.S., 2007, "Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications", *Chemical reviews*, 107(7): p. 2891-2959.
- Cheong, Y.L., Yam, F.K., Chin, I.K., Hassan, Z., 2013, "X-ray analysis of nanoporous TiO₂ synthesized by electrochemical anodization", *Superlattices Microstruct.*, 64: p. 34-43.
- Corradi, A.B., Bondioli, F., Focher, B., Ferrari, A. M., Grippo, C., Mariani, E., & Villa, C., 2005, "Conventional and microwave-hydrothermal synthesis of TiO₂ nanopowders", *Journal of the American Ceramic Society*, 88(9): p. 2639-2641.
- Ding, K., Miao, Z., Hu, B., An, G., Sun, Z., Han, B., & Liu, Z., 2010, "Study on the Anatase to Rutile Phase Transformation and Controlled Synthesis of Rutile Nanocrystals with the Assistance of Ionic Liquid", *Langmuir*, 2010. 26(12): p. 10294-10302.
- Duman, Ş., Bulut, B., Ozkal, B., 2020, "Antibacterial and Optical Properties of Mn Doped ZnO Nanopowders Synthesized via Spray Drying and Subsequent Thermal Decomposition", *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 35(4), p. 1073-1081.
- Feng, P., Gao, C., Shuai, C., Peng, S., 2015, "Toughening and strengthening mechanisms of porous akermanite scaffolds reinforced with nano-titania", *RSC advances*, 5(5), p. 3498-3507.
- Hashimoto, K., Irie H., Fujishima, A., 2005, "TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects", *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(12R): p. 8269.
- Hird, M., 1976, "Transmission of ultraviolet light by films containing titanium pigments—applications in uv curing", *Pigment & Resin Technology*.
- Li, H., Duan, X., Liu, G., Jia, X., Liu, X., 2008, "Morphology controllable synthesis of TiO₂ by facile hydrothermal process", *Materials Letters*, 62(24): p. 4035-4037.
- Manjunath, K., Yadav, L. S. R., Jayalakshmi, T., Reddy, V., Rajanaika, H., Nagaraju, G., 2018, Ionic liquid assisted hydrothermal synthesis of TiO₂ nanoparticles: photocatalytic and antibacterial activity. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(1): p. 7-13.
- McCormick, J.R., J. R., Zhao, B., Rykov, S. A., Wang, H., & Chen, J. G., 2004. "Thermal stability of flame-synthesized anatase TiO₂ nanoparticles", *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(45): p. 17398-17402.
- Mioduska, J., Zielińska-Jurek, A., Janczarek, M., & Hupka, J., 2016. "The Effect of Calcination Temperature on Structure and Photocatalytic Properties of WO₃/TiO₂ Nanocomposites" *Journal of Nanomaterials*, vol. 2016, Article ID 3145912, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2016/3145912>
- Nalwa, H.S., 2000, *Handbook of nanostructured Materials and Nanotechnology, Vol 2: Spectroscopy and Theory*, Academic Press, p. 155-167.
- Pelizzetti, E., C. Minero, 1993, "Mechanism of the photo-oxidative degradation of organic pollutants over TiO₂ particles", *Electrochimica acta*, 38(1): p. 47-55.
- Phomma, S., T. Wutikhun, P. Kasamechonchung, T. Eksangsri, C. Sapcharoenkun, 2020. "Effect of Calcination Temperature on Photocatalytic Activity of Synthesized TiO₂ Nanoparticles via Wet Ball Milling Sol-Gel Method ", *Applied Science*, 10(3): p. 993-1006.
- Rao, N.N., S. Dube, 1996, "Photocatalytic degradation of mixed surfactants and some commercial soap/detergent products using suspended TiO₂ catalysts", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 104(3): p. L197-L199.
- Tan, Z., K. Sato, S. Ohara, 2015, "Synthesis of layered nanostructured TiO₂ by hydrothermal method", *Advanced Powder Technology*, 26(1): p. 296-302.
- Tatar, C., Bagci, D., Kaygili, O., 2016, "The effects of high amounts of Al and Zn on the structural properties of hydroxyapatite prepared by sol-gel method", *J. Ceram. Process. Res.*, 17: p. 426-429

- Tomić, N., Grujić-Brojčin, M., Finčur, N., Abramović, B., Simović, B., Krstić, J., Šćepanović, M., 2015, "Photocatalytic degradation of alprazolam in water suspension of brookite type TiO₂ nanopowders prepared using hydrothermal route", *Materials Chemistry and Physics*, 163, p. 518-528.
- Venkateswarlu, K., Chandra Bose, A., Rameshbabu, N., 2010, "X-ray peak broadening studies of nanocrystalline hydroxyapatite by Williamson-Hall analysis", *Phys. B*, 405: p. 4256–4261.
- Yang, J., Mei, S., Ferreira J., 2001, "Hydrothermal synthesis of TiO₂ nanopowders from tetraalkylammonium hydroxide peptized sols", *Materials Science and Engineering: C*, 15(1-2): p. 183-185.
- Zheng, L., Xu, M., Xu, T., 2000, "TiO_{2-x} thin films as oxygen sensor", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 66(1-3): p. 28-30.
- Wu, H., Fan, J., Liu, E., Hu, X., Ma, Y., Fan, X., Tang, C., 2015, "Facile hydrothermal synthesis of TiO₂ nanospindles-reduced graphene oxide composite with a enhanced photocatalytic activity" *Journal of Alloys and Compounds*, 623: p. 298-303.



KUMLU ZEMİNDE TEŞKİL EDİLEN KAZIKLI RADYE TEMEL SİSTEMLERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ: KKTC-LEFKE ÖRNEĞİ

¹Ömür ÇİMEN , ²Uğur OSMANOĞLU 

^{1,2}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE
¹omurcimen@sdu.edu.tr, ²ugurosmanoglu98@gmail.com

(Geliş/Received: 09.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.07.2021)

ÖZ: Bu çalışmada, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nin Lefke ilçesinde yer alan kumlu bir zeminde oturma probleminin dolayı tasarlanan kazıklı radye temel sistemlerinin dinamik davranışları incelenmiştir. Tasarım ve analizler için, öncelikle Etabs programında 19 katlı 60,5 m yüksekliğinde betonarme bina modellenmiştir. Kumlu zeminde radye temel teşkil edilmesi halinde üstyapıdan temele aktarılan maksimum aksenal yükün oturma probleminin dolayı güvenilir bir şekilde taşınmadığı hesapla gösterilmiş ve ardından kazıklı radye temel tasarımlarına gidilmiştir. Kazık tasarımlarında sistemin değişken parametreleri olarak kazık sayısı, kazık çapı ve kazık uzunluğu değerleri kullanılmıştır. Bu bağlamda, 18 farklı kazıklı radye temel tasarımı yapılmış ve bu tasarımların her biri Plaxis 2D programında modellenerek dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler sonucunda, temel sistemlerinde oluşan oturma ve yanal deformasyon değerleri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak, kazık sayısı, kazık çapı ve kazık uzunluğunun, kumlu zeminde tasarlanan kazıklı radye temel sistemlerinde dinamik etki altında oluşan deformasyonları nasıl etkilediği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kumlu zemin, Kazıklı radye temel, Dinamik analiz, Deformasyon

An Investigation of the Dynamic Behavior of Piled Raft Foundation Systems Constituted on Sandy Soil: The Example of TRNC-Lefke

ABSTRACT: In this study, dynamic behavior of piled raft foundation systems designed due to settlement problem on a sandy soil in Lefke district of the Turkish Republic of Northern Cyprus has been investigated. For design and analysis, firstly a 19 storey 60.5 m high reinforced concrete building was modeled in the Etabs program. In case of raft foundation on sandy soil, it has been shown by calculation that the maximum axial load transferred from the superstructure to the foundation is not reliably carried due to the settlement problem, and then piled raft foundation designs have been made. In the pile designs, number of piles, diameter of piles and length of piles were used as variable parameters of the system. In this context, 18 different piled raft foundation designs were made and dynamic analysis were carried out by modelling of each of these designs in Plaxis 2D program. As a result of the dynamic analysis, the settlement and lateral deformation values in the foundation systems were examined. As a result of this study, it was determined how number of piles, diameter of piles and length of piles affect the deformations that formed under dynamic effect in piled raft foundation systems designed on sandy soil.

Key Words: Sandy soil, Piled raft foundation, Dynamic analysis, Deformation

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüzeeye yakın kötü zemin koşulları geoteknik mühendisleri için bazı zorlukları ortaya çıkarır. Çoğu durumda, yüzeysel temel teşkil edilmesi halinde taşıma gücü veya oturma problemi oluşacak zeminlerde pratik temel seçeneği olarak derin temel sistemleri (kazıklar) kullanılır (Taha ve diğ., 2015). Kazıklı radye temeller, üstyapı yükünü, yüzeeye yakın zayıf zemin tabakalarını aşarak daha derindeki sağlam zemin tabakalarına aktarmak için kullanılır, bu da taşıma gücünü artırmayı ve zeminde oluşacak deformasyonları azaltmayı amaçlamaktadır (Zhan ve diğ., 2012).

Kazıklı radye temeller, önemli yanal yüklere direnç göstermelerinin beklendiği sismik olarak aktif alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. (Taha ve diğ., 2015). Kazıklı radye temellerin deprem yüklemesi altındaki davranışı, yapıların performansını büyük ölçüde etkileyen önemli bir konudur (Rahmani ve Pak, 2012). Deprem bölgelerinde teşkil edilen binaların oturduğu zeminler, deprem sırasında aşırı deformasyon yaparlarsa bu durum üstyapıda aşırı deplasmanların oluşmasına, taşıyıcı elemanların özelliklerini kaybetmesine, yıkımlara ve can kayıplarına sebebiyet verebilir. Bu sebepten dolayı temel zemininin doğru bir şekilde tanımlanması ve temel tasarımının doğru yapılması inşaat projeleri için fevkalade önem arz etmektedir (Chourasia ve diğ., 2018).

Kazıklı radye temeller, zeminde taşıma gücünü artıran ve deformasyonları azaltan önemli yapı elemanlarıdır. Bu özelliklerinden dolayı kazıklı radye temellerin imalatları son yıllarda artmıştır (Ha ve diğ., 2018). Kazıklı radye temel sistemlerinin kullanımına olan yüksek talep nedeniyle, araştırmacılar bu sistemin statik ve dinamik yükleme altındaki davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir (Baziar ve diğ., 2018). Sadek ve Shahrour yaptıkları çalışmada kazıkların baş ve ucundaki bağlantı koşullarının sismik yüklemeye tepkileri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma, tamamen üç boyutlu bir sonlu eleman modellemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rayleigh sönümlenmesi ile zeminin elastik olduğu varsayılmış, üstyapı ise konsantre bir kütle ve bir kolondan oluşan tek serbestlik dereceli bir sistemle modellenmiştir. Çalışma hem dikey hem de eğimli kazıklar için yapılmıştır. Kazıkların dinamik etkiler ve sismik kuvvetler etkisi altındaki davranışlarını inceleyerek sismik yük etkisiyle makaslama kuvvetlerinde ve burulma momentlerinde azalma olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, kazıkların ucunun sert bir alt katmana gömülmesinin, kazıklardaki iç kuvvetlerde aşırı artışa yol açtığını göstermişlerdir (Sadek ve Shahrour, 2006).

Ordu ve Özkan yaptıkları çalışmada katman dayanımları arasında ani değişimler bulunan iki farklı zemin profili içerisinde aynı kazık yapısını sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyip incelemişlerdir. Çalışmalarında değişik zemin ve yapı koşullarını temsil eden bir model üzerinde, uç ve sürtünme kazıklarının kullanıldığı iki farklı durum için 0.3 g büyüklüğünde bir deprem kaydı kullanarak analizler yapmışlardır. Farklı katmanlardan oluşan zemin profillerinde deprem etkisindeki kazıklarda, makaslama kuvvetleri ile momentlerin büyüklüğü ve dağılımının, zemin şartları ile deprem yüklerine bağlı olduğunu göstermişlerdir (Ordu ve Özkan, 2006).

Uzuoka ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sıvılaşmış bir zeminde grup kazıkların deprem davranışını üç boyutlu olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında 1995 Kobe depremi sırasında meydana gelen ciddi kazık hasarı nedeniyle eğilen beş katlı bir binayı analiz etmişlerdir. Analizler, kazıkların, binanın yatay yer değiştirmesi 10 cm'ye ulaştığında, tam sıvılaşmadan hemen önce aktığını göstermiştir (Uzuoka ve diğ., 2007).

Alsaleh ve Shahrour yaptıkları çalışmada kazık-zemin-yapı ilişkisini sismik durum altında üç boyutlu olarak araştırmışlardır. Zemin, Mohr-Coulomb kriteri kullanarak modellenmişlerdir. Çalışmada hem harmonik yükleme hem de kaydedilen deprem hareketleri için analizler yaparak zemin ve kazığın doğrusal olmayan davranışını incelemişlerdir. Zamana bağlı olarak deplasman değerlerini, kazıklardaki en elverişsiz durumdaki aksel kuvvet ve burulma momenti değerlerini, elastik ve elasto-plastik durumlar için elde etmişlerdir. Zeminin plastikliğin, üstyapıya enerji geçişini azalttığı ve atalet kuvvetlerindeki artışın önemli olduğunu göstermişlerdir (Alsaleh ve Shahrour, 2009).

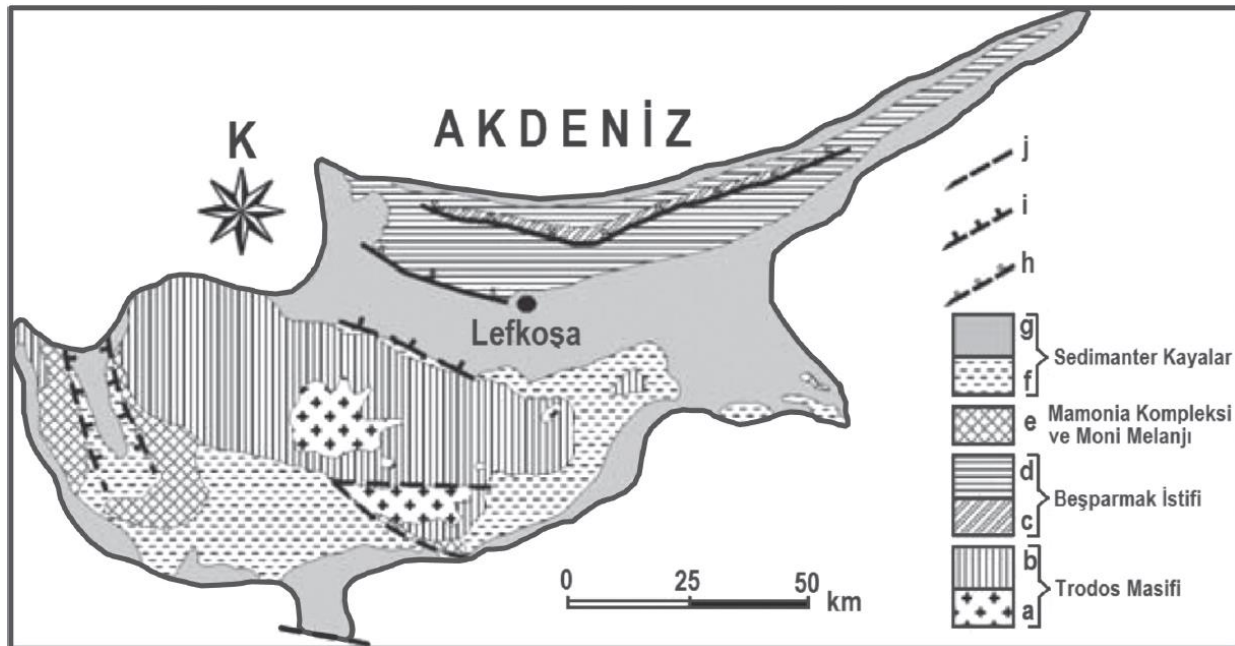
Osmanoğlu yaptığı çalışmada farklı zemin gruplarında (killi ve kumlu) tasarlanan kazıklı radye temel sistemlerinin statik ve dinamik koşullar altında deformasyon tabanlı optimizasyonunu yapmıştır. Kazıklı radye temel sistemlerinde değişken parametreler olarak kazık sayısı, kazık çapı ve kazık uzunluğu

değerlerini kullanmıştır. Yapılan tasarımlar, statik analizler, dinamik analizler ve maliyet hesapları neticesinde her iki zemin grubunda da deformasyon tabanlı optimum kazık sayısı, kazık çapı ve kazık uzunluğu değerleri saptanmıştır. Optimum değerler saptanırken ekonomi de göz önünde tutulmuştur (Osmanoğlu, 2021).

Bu çalışmada, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nin Lefke ilçesinde yer alan kumlu zeminde oturma probleminin dolayı tasarlanan kazıklı radye temel sistemlerinin dinamik davranışları incelenmiştir. Bu bağlamda kazıklı radye temel sistemlerinde değişken parametreler olarak kazık sayısı, kazık çapı ve kazık uzunluğu değerleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 18 farklı kazıklı radye temel tasarımı yapılmış, bu tasarımlar Plaxis 2D programında modellenmiş ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler neticesinde kumlu zeminde oluşan oturma ve yanal deformasyon değerlerine bakılarak, kazık sayısı, çap ve uzunluk değerlerinin dinamik durumda oluşan deformasyonları nasıl etkilediği saptanmaya çalışılmıştır.

KIBRIS ADASI'NIN GENEL JEOLJİSİ VE DEPREMSELLİĞİ (THE GENERAL GEOLOGY AND SEISMICITY OF CYPRUS ISLAND)

Kıbrıs Adası; Beşparmak Dağları, Trodos Ofiyoliti ve Mamonia Kompleksi olmak üzere üç tektonik bölgeden oluşur. Ada'nın yapısal birimleri Şekil 1'de verilmiştir. Ada'daki tektonik bölümlerin her biri Doğu Akdeniz'de Neotetis okyanus havzalarının kapanmasıyla sonuçlanan levha hareketlerinin ve çok çeşitli paleo-ortamların ürünleridir (Hakyemez, 2004).

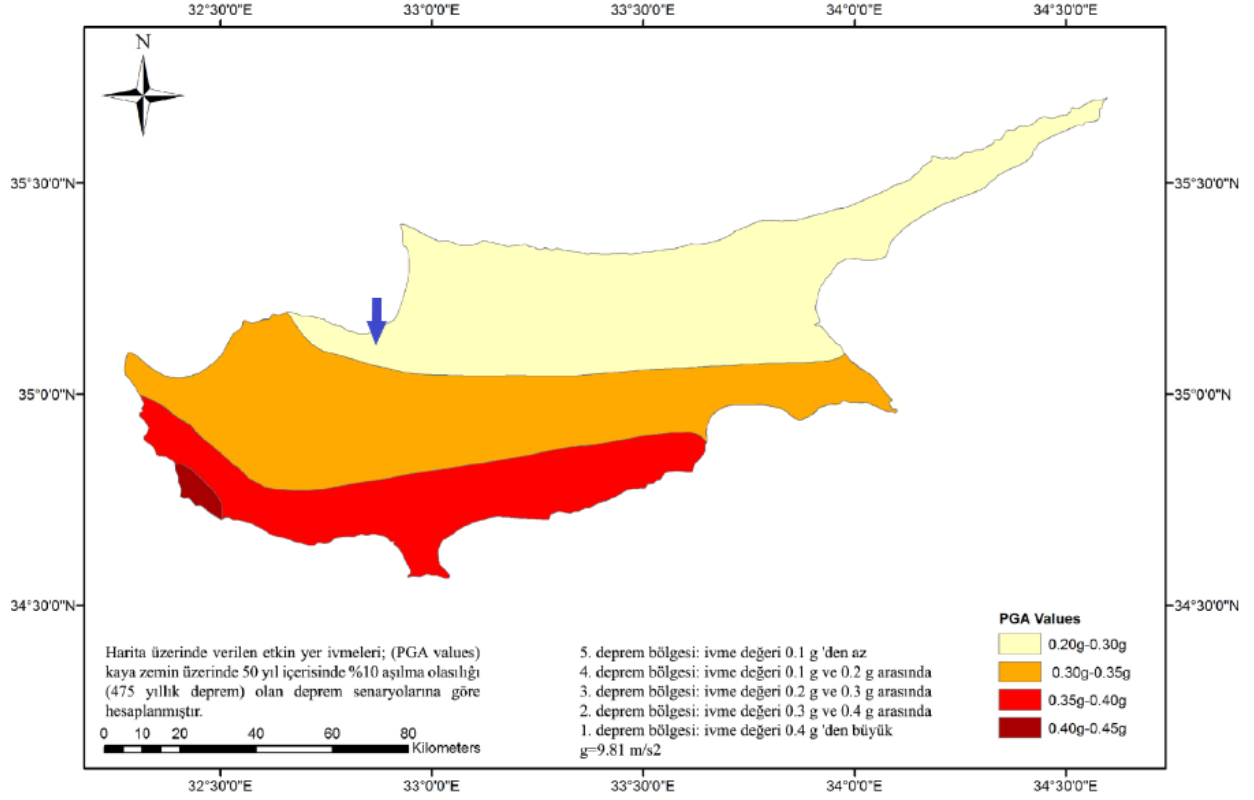


Şekil 1. Kıbrıs Adası'nın yapısal birimleri. a: plütonik kompleks, b: ekstrüzyonlar ve levha daykları, c: Mesozoyik-Eosen, d: Oligosen-Miyosen, e: Mamonia kompleksi ve Moni melanjı, f: Kretase-Miyosen, g: Pliyosen-güncel, h: bindirme, i: normal fay, j: tektonik hat (Elmas, 2018)

Figure 1. Structural units of Cyprus island. a: plutonic complex, b: extruders and plate dykes, c: Mesozoic-Eocene, d: Oligocene-Miocene, e: Mamonia complex and Moni-melange, f: Cretaceous-Miocene, g: Pliocene-current, h: overlap, i: normal fault, j: tectonic line (Elmas, 2018)

Kıbrıs Adası, Dünya'daki sismik hareketlerin yaklaşık %15'inin meydana geldiği Alp-Himalaya deprem kuşağında yer alır. Kıbrıs'taki depremlerin oluşmasına yol açtığı düşünülen "Kıbrıs Yayı" Kıbrıs'ın yer aldığı bölgede, Afrika ile Avrasya Litosferik Levhaları arasındaki tektonik sınırı oluşturmaktadır. Bu "Yay" Kıbrıs'ın güney ve batısında deniz içerisinde yer alır. Depremlerin pek çoğunun bu yay üzerinde ortaya çıkması bu yay boyunca tektonik hareketlerin oluştuğunu ve bunun da

depremlere yol açtığını göstermektedir (Dindar ve diğ., 2015). Kıbrıs Adası'nın deprem haritası Şekil 2'de verilmiştir. İnceleme alanı Şekil 2'de verilen mavi ok ile gösterilen bölgedir.

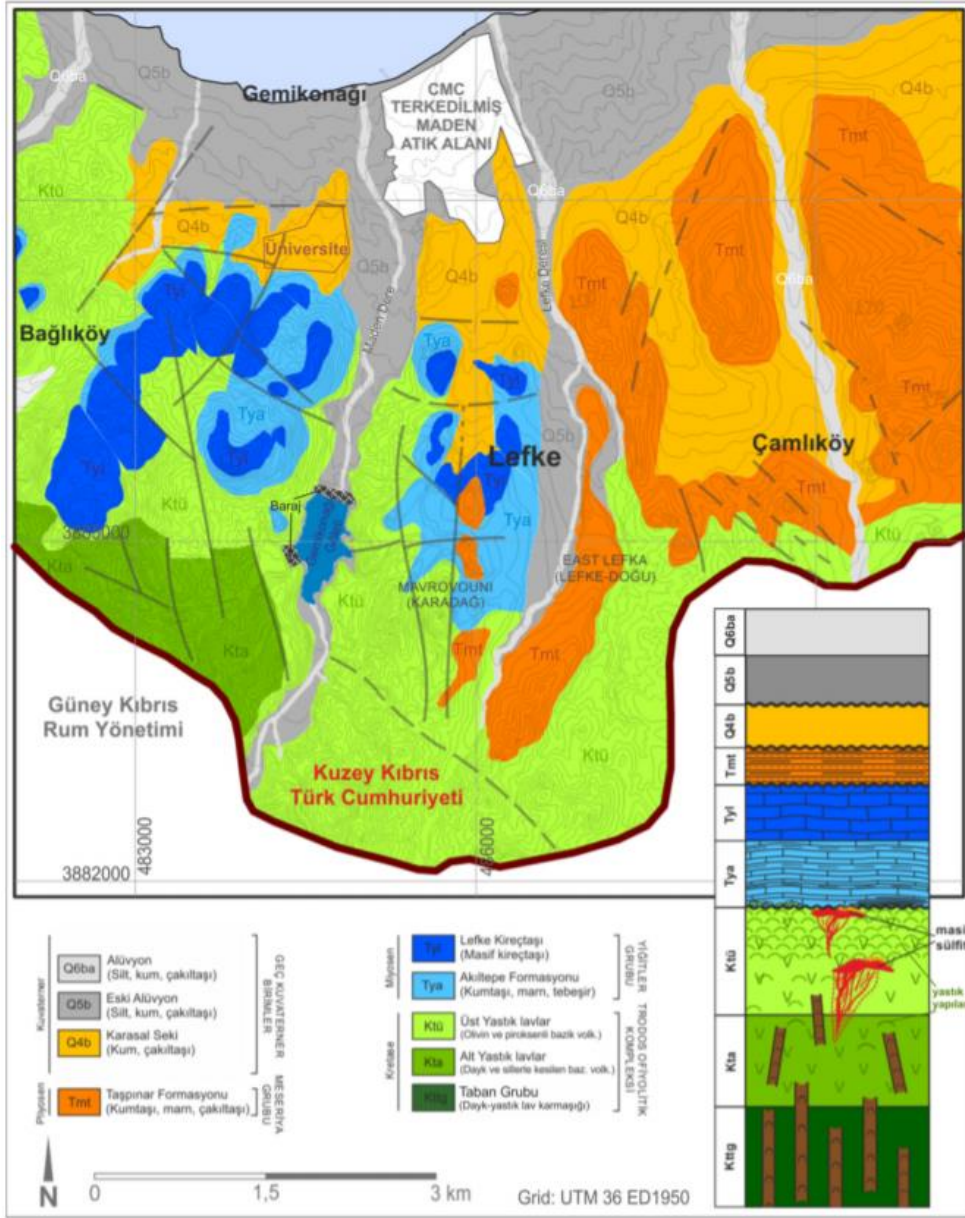


Şekil 2. Kıbrıs Adası deprem haritası (KKTC DBYBHY, 2015)

Figure 2. The earthquake map of Cyprus Island (KKTC DBYBHY, 2015)

İnceleme Alanının Tanıtılması (Introducing of Investigation Area)

İnceleme alanı, Kıbrıs Adası'nın Lefke ilçesinde yer almaktadır. İnceleme alanının bağlı olduğu Lefke bölgesine ait jeoloji haritası ve ölçeksiz stratigrafi kesiti Şekil 3'te verilmiştir. İnceleme alanı Şekil 3'teki haritaya göre Geç Kuvaterner Birimleri içerisinde "Karasal Seki (Kum, çakıltası)" kuvaterneridir.



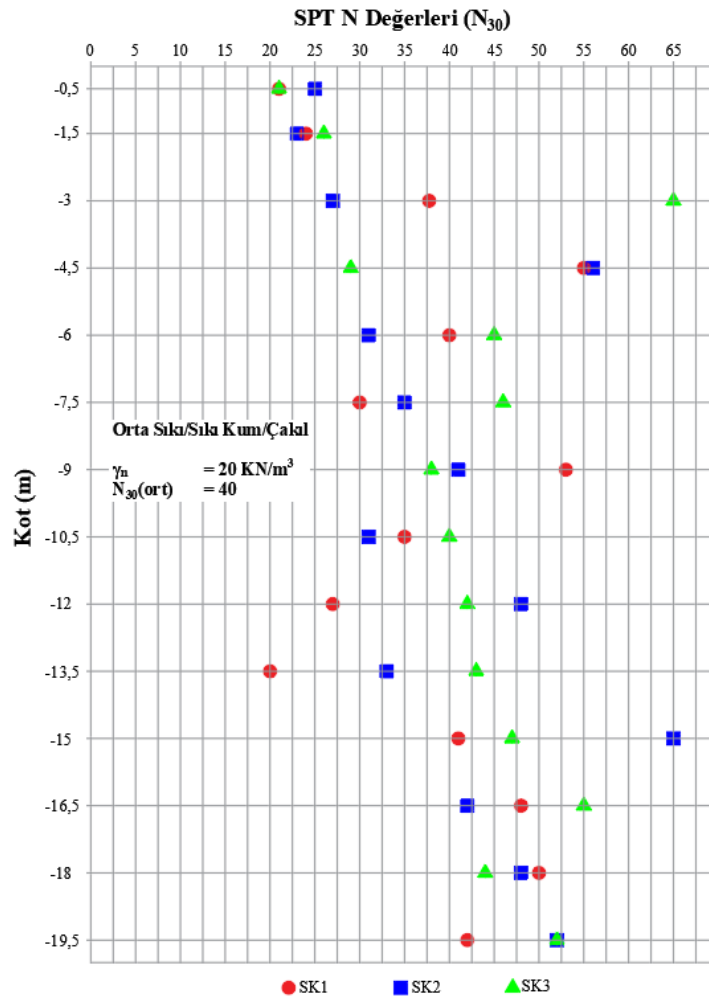
Şekil 3. Lefke bölgesi jeoloji haritası ve ölçeksiz stratigrafi kesiti (Yurtseven, 2018)

Figure 3. Lefke region geological map and unscaled stratigraphic section (Yurtseven, 2018)

İnceleme alanında saha araştırması amacıyla 3 adet sondaj kuyusu açılmış ve bütün kuyularda 20 m derinliğe kadar, her 1.5 m'de bir Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapılmış ve penetrasyon dirençleri (N_{30}) kaydedilmiştir.

İnceleme alanında yapılmış olan SPT deneylerinden elde edilen verilere göre 20 m'lik derinlikte kaydedilen ortalama standart penetrasyon darbe sayısı 40'tır (Geoteam, 2018). Her 3 kuyuda da 0.00 m – (-20.00) m aralığındaki zeminin tanımlaması "Grimsi-beyaz renkli, az killi, kötü yuvarlanmış, köşeli üst düzeyler ince-orta daneli, alt düzeyler orta-iri daneli, yer yer volkanik kökenli çakıltaşı blokları içeren "Orta Sıkı / Sıkı Kum / Çakıl" şeklindedir. Bu verilerden yola çıkarak 20 m'lik zemin tabakası, tek bir tabaka olarak düşünülmüştür. Yapılan sondajlarda yer altı suyuna rastlanmamıştır (Geoteam, 2018).

Sondajlarda karşılaşılan zemin içerisinde yapılan SPT deneylerinde kaydedilen N_{30} değerlerinin derinliğe bağlı dağılımını gösteren grafik Şekil 4'de verilmiştir.



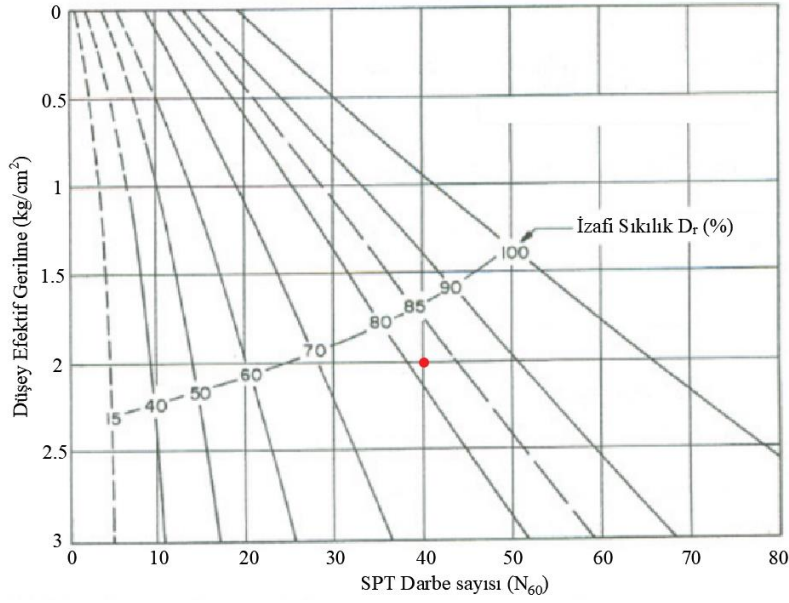
Şekil 4. SPT-Derinlik dağılım grafiği (Geoteam, 2018)

Figure 4. SPT-Depth distribution graph (Geoteam, 2018)

Kumlu zeminin mühendislik parametreleri, literatürde yer alan SPT darbe sayısı ile zeminin mühendislik parametreleri arasındaki korelasyonlardan faydalanılarak hesaplanmıştır. Hesaplarda kullanılan korelasyonların seçiminde efektif gerilmeyi de dikkate alan korelasyonun seçilmesine özen gösterilmiştir. Kumlu zeminin içsel sürtünme açısı Denklem 1'e göre hesaplanmıştır. Denklem 1'de ϕ içsel sürtünme açısını, N SPT darbe sayısını, σ'_0 ise düşey efektif gerilmeyi simgelemektedir (OCDI, 2002).

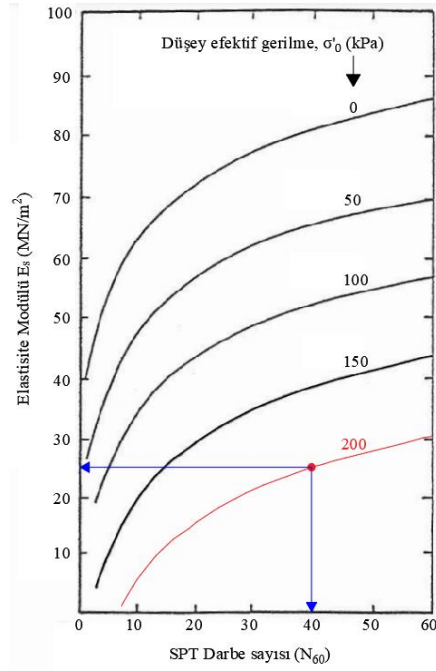
$$\phi = 25 + 3,2x \sqrt{\frac{100.N}{70+\sigma'_0}} \quad (1)$$

Kumlu zeminin izafi sıklığı Şekil 5'deki korelasyona göre, elastisite modülü ise Şekil 6'daki korelasyona göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar neticesinde kumlu zemin profilinin mühendislik parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 5. SPT darbe sayısı ve izafi sıklık arasındaki korelasyon (Gibbs ve Holtz, 1957)

Figure 5. Correlation between SPT blow count and relative density (Gibbs and Holtz, 1957)



Şekil 6. Granüler zeminler için SPT darbe sayısı ve elastisite modülü arasındaki korelasyon (Menzenbach, 1967)

Figure 6. Correlation between SPT blow count and modulus of elasticity for granular soils (Menzenbach, 1967)

Çizelge 1. Kumlu zemin profilindeki tabakanın mühendislik parametreleri

Table 1. Engineering parameters of layer in sandy soil profile

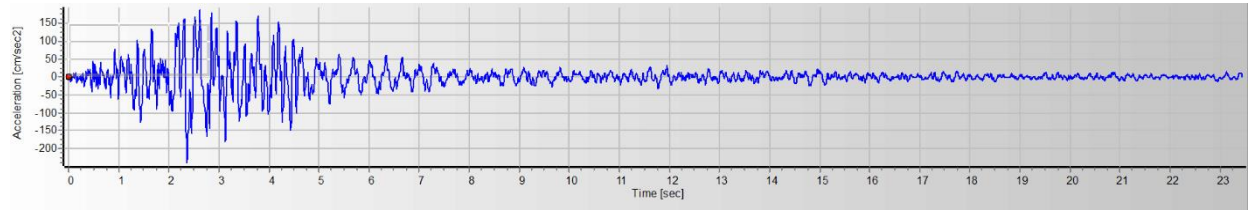
Tabaka	Kot (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (KN/m^3)	Ortalama SPT Darbe Sayısı	Elastisite Modülü (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ($^\circ$)	İzafi Sıklık (%)
Orta sıkı/sıkı kum/çakıl	± 0.0 -(-20.0)	20	40	25000	37	82

Çalışma kapsamındaki dinamik analizler için kullanılan deprem ivme kaydına ait bilgiler Çizelge 2’de, kaydın ivme-zaman fonksiyonu ise Şekil 7’de verilmiştir. Yapılan modellemelerde dinamik analiz süresi 10 sn olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 2. Deprem ivme kaydına ait bilgiler

Table 2. Informations on earthquake acceleration record

Deprem Adı	Deprem Gerçekleştiği Yıl	Deprem Büyüklüğü (ML)	Maksimum Yer İvmesi (cm/sn ²)
Upland California	1990	5,4	239,9



Şekil 7. Deprem kaydına ait ivme-zaman fonksiyonu

Figure 7. Acceleration-time function of earthquake record

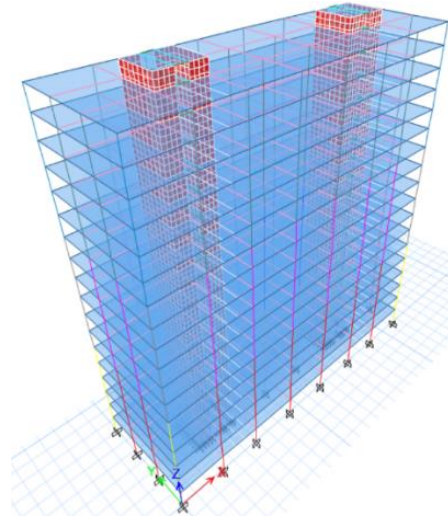
ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Kumlu zeminde tasarımı yapılacak olan temel tipinin belirlenmesi için üstyapıdan temele aktarılacak aksel yük değerine ihtiyaç vardır. Bu sebepten dolayı Etabs V18 programında betonarme bina modeli yapılmıştır. Betonarme bina modeline ait bilgiler Çizelge 3’te verilmiştir. Betonarme bina modelinde kullanılan hareketli yük ve kar yükü değerleri TS498 1987 standardından, rüzgar yükü parametreleri ise TS EN 1991-1-4 2007 standardından alınmıştır. Betonarme bina modeli TS500 2000 standardına ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018’e uygun olarak yapılmıştır. Betonarme bina modelinin 3 boyutlu görseli Şekil 8’de verilmiştir.

Çizelge 3. Üstyapıya ait bilgiler

Table 3. Informations of superstructure

Taşıyıcı Sistem	Yapı Yüksekliği (m)	Kat Adedi	Kat Yüksekliği (m)	Yapı Oturma Alanı Geometrisi	Yapı Oturma Alanı (m ²)
Perde + çerçeve	60,5	19	3,25	Dikdörtgen	18x54



Şekil 8. Bina 3D modeli
Figure 8. Building 3D model

Betonarme binanın modellenmesi ve analizi neticesinde farklı yük kombinasyonları için temele aktarılan aksenal yük değerleri Çizelge 4’de verilmiştir. Kombinasyonlarda G ölü yükü, Q ise hareketli yükü simgelemektedir. Çizelge 4’den görüleceği üzere farklı yük kombinasyonları için temele aktarılan en büyük aksenal yük değeri 430924 KN’dir.

Çizelge 4. Farklı yük kombinasyonları için temele aktarılan aksenal yük değerleri

Table 4. Axial load values transferred to the foundation for different load combinations

Kombinasyon	1,4G+1,6Q	G+Q	Depremler kombinasyonlar (maksimum değer)	Rüzgarlı kombinasyonlar (maksimum değer)
Eksenal Yük (KN)	374709	262628	430924	308423

Temel tasarımında dikkate alınan maksimum aksenal yük değeri 430924 KN’dir. Temel tipi olarak ilk önce radye temel sistemi seçilmiştir. Üstyapının plan ebatları referans alınarak radye temelin plan ebatları 21x57 m kalınlığı ise 2 m olarak belirlenmiştir. Radye temelin, üstyapıdan kendisine aktarılan yükü güvenli bir şekilde taşıyıp taşımadığı ve izin verilen oturma değerini aşıp aşmadığı kontrolleri yapılmıştır.

Radye temel taşıma gücü hesabı Denklem 2’ye göre yapılmıştır. Denklem 2’de q_k radye temel taşıma gücünü, q temel derinliğindeki efektif gerilmeyi, N_q, N_γ taşıma gücü faktörlerini, γ zeminin birim hacim ağırlığını, B' radye temelin genişliğini, s_q, s_γ şekil katsayılarını, d_q, d_γ ise derinlik katsayılarını simgelemektedir (TBDY, 2018).

$$q_k = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B' N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \quad (2)$$

Radye temel oturma hesabı Denklem 3’e göre yapılmıştır. Denklem 3’te s_e elastik oturmaya, q_t radye temel emniyetli taşıma gücünü, N ise SPT darbe sayısını simgelemektedir (Meyerhof, 1965).

$$s_e = \frac{2q_t}{N} \quad (3)$$

Kumlu zeminde radye temelin temel taban basıncı, emniyetli taşıma gücü, oturma ve izin verilen oturma değerleri Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. Radye temel için temel taban basıncı, emniyetli taşıma gücü, oturma ve izin verilen oturma değerleri

Table 5. Foundation base pressure, safe bearing capacity, settlement and allowable settlement values for raft foundation

Radye Temel Taban Basıncı (kPa)	Radye Temel Emniyetli Taşıma Gücü (kPa)	Radye Temel Oturma Değeri (cm)	İzin Verilen Oturma Değeri (cm)
410	12524	62	5

Çizelge 5’den görüleceği üzere kumlu zeminde oturma probleminden dolayı radye temel tasarımının emniyetsiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kumlu zeminde oturma probleminden dolayı radye temel tasarımı uygun görülmemiş ve kazıklı radye temel tasarımına gidilmiştir. Kazıklı radye temel tasarımlarında radye temelin ebat uzunlukları 21x57x2 m olarak alınmıştır.

Kumlu zeminde kazık gruplarının eksenel yük kapasitesi statik taşıma gücü formüllerinden hesaplanmıştır.

Kazık uç direnci Denklem 4’e göre hesaplanmıştır. Denklem 4’de Q_p kazık uç direncini, A_p kazık taban alanını, p_a atmosferik basıncı, N_q taşıma gücü faktörünü, ϕ ise taşıyıcı tabakanın efektif içsel sürtünme açısını simgelemektedir (Das, 2010).

$$Q_p = A_p \cdot 0,5 \cdot p_a \cdot N_q \cdot \tan\phi \quad (4)$$

Kazık sürtünme direnci Denklem 5’e göre hesaplanmıştır. Denklem 5’de Q_s kazık sürtünme direncini, p kazık kesitinin çevresini, L kazık uzunluğunu, K efektif toprak basınç katsayısını, σ'_0 dikkate alınan derinlikteki düşey efektif gerilmeyi, δ ise zemin-kazık sürtünme açısını simgelemektedir (Das, 2010).

$$Q_s = p \cdot L \cdot K \cdot \sigma'_0 \cdot \tan\delta \quad (5)$$

Çalışma kapsamında kazık sayısı, kazık uzunluğu ve kazık çapı parametrelerinin temel sistemlerinde dinamik (deprem) durumda oluşan deformasyon değerlerine etkilerinin incelenmesi maksadıyla kazıklar farklı sayı, uzunluk ve çaplarda tasarlanmıştır. Tasarlanan bütün modeller üstyapıdan gelen maksimum eksenel yükü taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan tasarımlarda bütün yükün kazıklar tarafından taşındığı kabulü yapılmıştır.

Kazık tasarımlarında öncelikle kazık sayısı sabit tutularak kazık uzunluğu ve çapı değiştirilmiş, daha sonra kazık çapı sabit tutularak kazık uzunluğu ve sayısı değiştirilmiş, son olarak kazık uzunluğu sabit tutularak kazık çapı ve sayısı değiştirilmiştir. Kazık sayısı, kazık uzunluğu ve kazık çapı parametrelerinin sabit tutulabilmesi için referans değerlere ihtiyaç vardır. Referans kazık parametre değerleri Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Referans kazık parametre değerleri

Table 6. Reference pile parameter values

Kazık Sayısı	Kazık Uzunluğu (m)	Kazık Çapı (cm)
15x7 (105)	14	100

Kazık sayısının sabit tutularak kazık uzunluğu ve kazık çapının değiştirilmesiyle oluşturulan modellere ait parametreler Çizelge 7’de, kazık çapının sabit tutularak kazık sayısı ve kazık uzunluğunun değiştirilmesiyle oluşturulan modellere ait parametreler Çizelge 8’de, kazık uzunluğunun sabit tutularak kazık sayısı ve kazık çapının değiştirilmesiyle oluşturulan modellere ait parametreler ise Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 7. Kazık sayısının sabit tutulduğu modellere ait parametreler*Table 7. Parameters belonging to the models in which the number of piles is kept constant*

Model	Kazık Sayısı	Kazık Uzunluğu (m)	Kazık Çapı (cm)
Model A	15x7 (105)	4	125
Model B	15x7 (105)	7	120
Model C	15x7 (105)	9	115
Model D	15x7 (105)	11	110
Model E	15x7 (105)	12,5	105
Model F	15x7 (105)	14	100
Model G	15x7 (105)	15,5	95
Model H	15x7 (105)	17	90

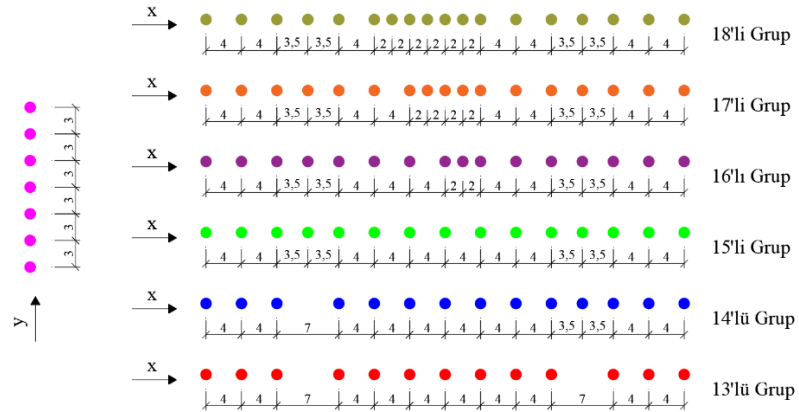
Çizelge 8. Kazık çapının sabit tutulduğu modellere ait parametreler*Table 8. Parameters belonging to the models in which the pile diameter is kept constant*

Model	Kazık Sayısı	Kazık Uzunluğu (m)	Kazık Çapı (cm)
Model I	18x7 (126)	10,5	100
Model J	17x7 (119)	11,5	100
Model K	16x7 (112)	13	100
Model L	14x7 (98)	15,5	100
Model M	13x7 (91)	17	100

Çizelge 9. Kazık uzunluğunun sabit tutulduğu modellere ait parametreler*Table 9. Parameters belonging to the models in which the pile length is kept constant*

Model	Kazık Sayısı	Kazık Uzunluğu (m)	Kazık Çapı (cm)
Model N	18x7 (126)	14	90
Model O	17x7 (119)	14	95
Model P	16x7 (112)	14	100
Model R	14x7 (98)	14	105
Model S	13x7 (91)	14	110

Çalışma kapsamında yapılan kazık tasarımlarında grup kesitindeki değişken kazık sayıları 18'li, 17'li, 16'lı, 15'li, 14'lü ve 13'lü olarak seçilmiştir. 18'li grupta 126, 17'li grupta 119, 16'lı grupta 112, 15'li grupta 105, 14'lü grupta 98, 13'lü grupta ise 91 adet kazık mevcuttur. Farklı gruplardaki kazıkların eksen mesafeleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekilde verilen ölçüler m cinsindedir. Tüm modellerde kazıkların y eksenindeki eksen mesafeleri eşit ve 3 m'dir.



Şekil 9. Farklı gruplardaki kazıkların eksen mesafeleri

Figure 9. Axis distances of piles in different groups

Çalışma kapsamında tasarlanan 18 farklı kazıklı radye temel tasarımının modelleme ve dinamik (deprem) analizleri Plaxis 2D sonlu elemanlar analiz programında yapılmıştır. Kumlu zemine ait modelleme parametreleri Çizelge 10'da verilmiştir.

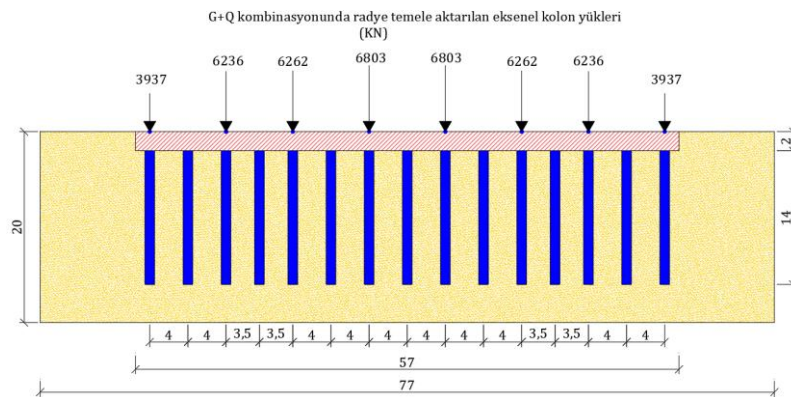
Çizelge 10. Modelleme parametreleri

Table 10. Modeling parameters

Tabaka	Malzeme Modeli	Malzeme Tipi	Birim Hacim Ağırlık γ_n (KN/m ³)	Elastisite Modülü (KN/m ²)	Poisson Oranı (ν)	İçsel Sürtünme Açısı (°)
Orta Sıkı/Sıkı Kum/Çakıl ± 0.0 -(-20.0)	Mohr-Coulomb	Drenajlı	20	25000	0,30	37

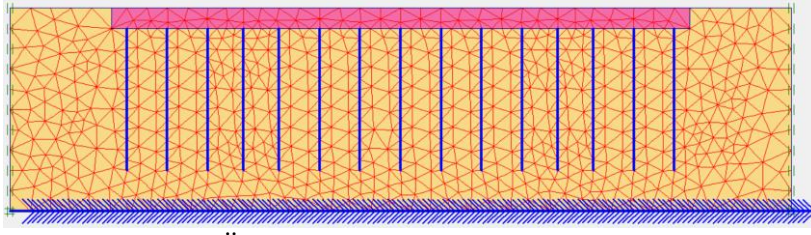
Çalışma kapsamında yapılan dinamik analizlerde düşey yük olarak üstyapıdan G+Q kombinasyonunda radye temele aktarılan eksenel yük değerleri kullanılmıştır (Şekil 10).

Kumlu zeminde tasarlanan kazıklı radye temel sistemleri için örnek model geometrisi Şekil 10'da örnek modelin Plaxis sonlu elemanlar ağı ise Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 10'da verilen uzunluk ölçüleri m cinsindedir.



Şekil 10. Örnek model geometrisi

Figure 10. Sample model geometry



Şekil 11. Örnek modelin Plaxis sonlu elemanlar ağı

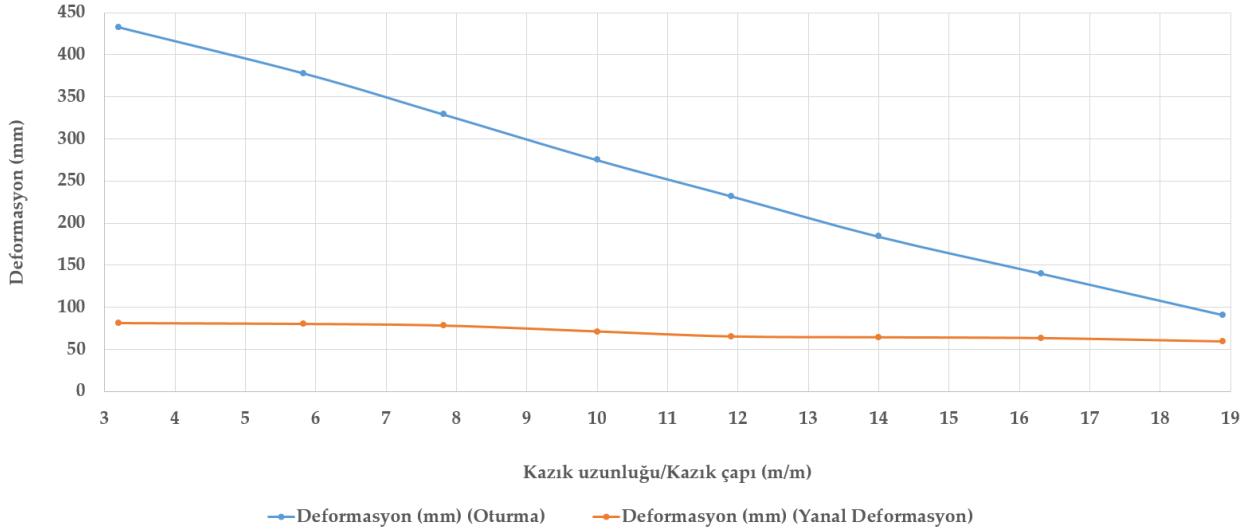
Figure 11. Plaxis finite element mesh for sample model

Kazık sayısının sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerleri (oturma ve yanal deformasyon) Çizelge 11’de ve bu modellerdeki deformasyon değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 12’de, kazık çapının sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerleri Çizelge 12’de ve bu modellerdeki deformasyon değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 13’te, kazık uzunluğunun sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerleri Çizelge 13’te ve bu modellerdeki deformasyon değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 14’de verilmiştir.

Çizelge 11. Kazık sayısının sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerleri

Table 11. Deformation values belonging to the models in which the number of piles is kept constant

Model	Kazık Sayısı	Kazık Uzunluğu (m)	Kazık Çapı (cm)	Oturma (mm)	Yanal Deformasyon (mm)	Kazık Uzunluğu/Kazık Çapı (m/m)
Model A	15x7 (105)	4	125	433	81	3,20
Model B	15x7 (105)	7	120	378	80	5,83
Model C	15x7 (105)	9	115	329	78	7,83
Model D	15x7 (105)	11	110	275	71	10
Model E	15x7 (105)	12,5	105	232	65	11,90
Model F	15x7 (105)	14	100	184	64	14
Model G	15x7 (105)	15,5	95	140	63	16,32
Model H	15x7 (105)	17	90	91	59	18,89



Şekil 12. Kazık sayısının sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerlerinin değişimi

Figure 12. Change of deformation values belonging to the models in which the number of piles is kept constant

Çizelge 12. Kazık çapının sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerleri

Table 12. Deformation values belonging to the models in which the pile diameter is kept constant

Model	Kazık Sayısı	Kazık Uzunluğu (m)	Kazık Çapı (cm)	Oturma (mm)	Yanal Deformasyon (mm)	Kazık Uzunluğu/Kazık Sayısı (m/adet)
Model I	18x7 (126)	10,5	100	272	70	0,58
Model J	17x7 (119)	11,5	100	247	67	0,67
Model K	16x7 (112)	13	100	206	65	0,81
Model L	14x7 (98)	15,5	100	151	63	1,10
Model M	13x7 (91)	17	100	102	60	1,30

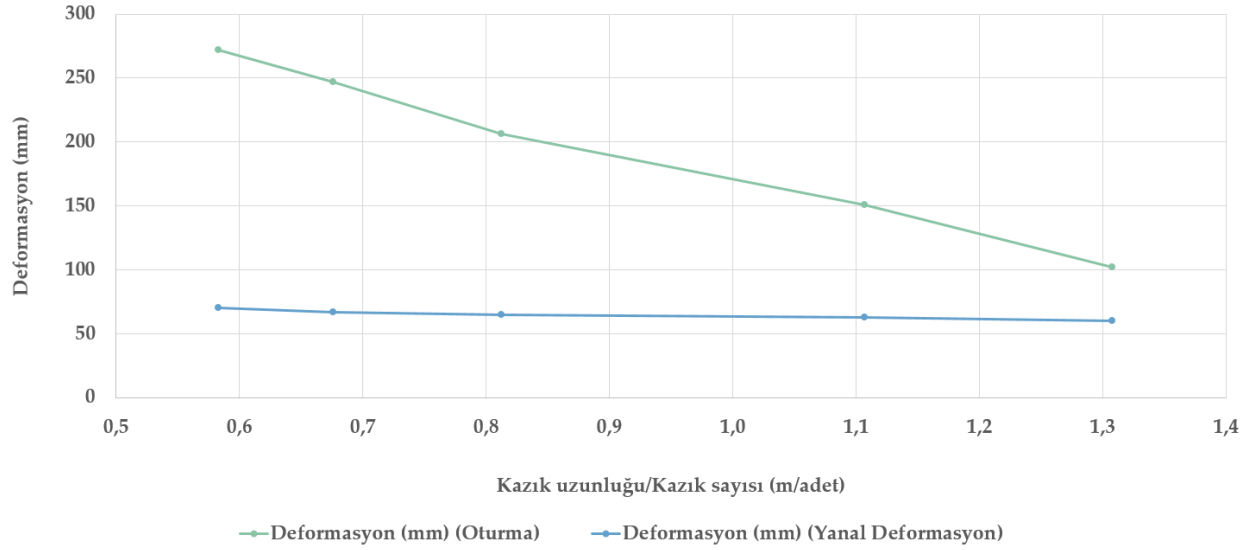
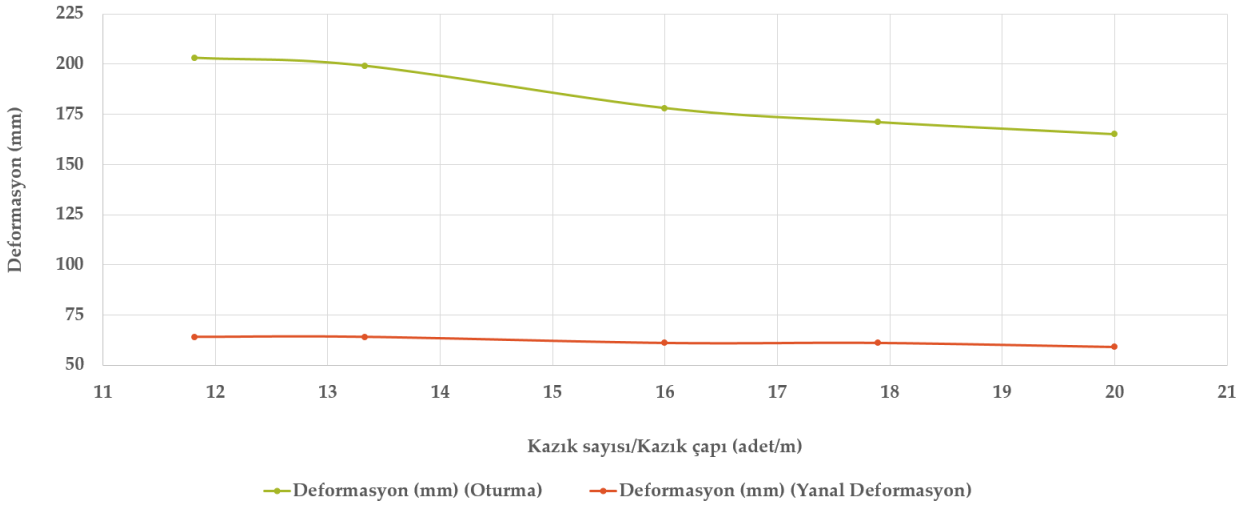
**Şekil 13.** Kazık çapının sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerlerinin değişimi

Figure 13. Change of deformation values belonging to the models in which the pile diameter is kept constant

Çizelge 13. Kazık uzunluğunun sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerleri

Table 13. Deformation values belonging to the models in which the pile length is kept constant

Model	Kazık Sayısı	Kazık Uzunluğu (m)	Kazık Çapı (cm)	Oturma (mm)	Yanal Deformasyon (mm)	Kazık Sayısı/Kazık Çapı (adet/m)
Model N	18x7 (126)	14	90	165	59	20
Model O	17x7 (119)	14	95	171	61	17,89
Model P	16x7 (112)	14	100	178	61	16
Model R	14x7 (98)	14	105	199	64	13,33
Model S	13x7 (91)	14	110	203	64	11,82



Şekil 14. Kazık uzunluğunun sabit tutulduğu modellere ait deformasyon değerlerinin değişimi

Figure 14. Change of deformation values belonging to the models in which the pile length is kept constant

SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nin Lefke ilçesinde yer alan kumlu zeminde, farklı kazık sayısı, çapı ve uzunluklarında tasarlanan kazıklı radye temel sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik analizleri yapılarak deprem davranışları incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kumlu zeminde, kazık sayısı sabit iken kazık uzunluğu artırılıp kazık çapı azaltıldıkça oturma değerinin doğrusal olarak azaldığı, yanıl deformasyon değerinin ise doğrusala yakın bir biçimde azaldığı tespit edilmiştir.
- Kumlu zeminde, kazık çapı sabit iken kazık uzunluğu artırılıp kazık sayısı azaltıldıkça oturma ve yanıl deformasyon değerlerinin doğrusala yakın bir biçimde azaldığı tespit edilmiştir.
- Kumlu zeminde, kazık uzunluğu sabit iken kazık sayısı artırılıp kazık çapı azaltıldıkça oturma değerinin doğrusala yakın bir biçimde azaldığı, yanıl deformasyon değerinin ise hemen hemen değişmediği tespit edilmiştir.
- Çalışma kapsamındaki kumlu zeminde tasarlanan kazıklı radye temel sistemlerinde, dinamik durumda oluşan deformasyonları azaltmanın en iyi yolunun kazık uzunluğunu artırmak olduğu tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alsaleh, H., Shahrour, I., 2009, "Influence of plasticity on the seismic soil–micropiles–structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 29, Sayı 3, ss. 574-578.
- Baziar, M.H., Rafiee, F., Lee, C.J., Azizkandi, A.S., 2018, "Effect of superstructure on the dynamic response of nonconnected piled raft foundation using centrifuge modeling", *International Journal of Geomechanics*, Cilt 18, Sayı 10.
- Chourasia, J., Pendharkar, U., Singh, R., 2018, "Dynamic analysis of pile foundation with footing in different foundation soils", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Cilt 5, Sayı 1, ss. 12-16.
- Das, B., 2010, *Principles of Foundation Engineering*, Cengage Learning, Stamford, United States of America.
- Dindar, H., Akgün, M., Atalar, C., Özdağ, Ö.C., İpek, Y., Tunçel, A., Akdemir, Ö., "K.K.T.C. Lefkoşa İlçesinde Yapılan Mikrotremor Çalışmaları", 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, DEÜ, İzmir, 14-16 Ekim 2015.

- Elmas, A., 2018, "Kıbrıs Adası yapısal süreksizliklerinin EGM08 gravite verileri kullanılarak belirlenmesi", *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Cilt 42, Sayı 1, ss. 17-32.
- Geoteam Mühendislik Ltd. Şti., 2018, *Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti Lefke ilçesi konut projesine ait sondaja dayalı temel ve zemin etüd raporu*, Lefke, KKTC.
- Gibbs, H.J., Holtz, W.G., "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing", *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, England, 35-39, August 1957.
- Ha, J.G., Ko, K.W., Jo, S.B., Park, H.J., Kim, D.S., 2018, "Investigation of seismic performances of unconnected pile foundations using dynamic centrifuge tests", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Cilt 17, Sayı 5, ss. 2433-2458.
- Hakyemez, A., 2004, *Kuzey Kıbrıs Oligosen-Pliyosen İstiflerinin Planktonik Foraminifera Biyostratigrafisi*, Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- KKTC DBYBHY, 2015, *KKTC Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti Bakanlar Kurulu, KKTC.
- Menzenbach, E., 1967, "Le capacidad suportante de pilotes y grupos de pilotes", *Technologia (Ingenieria Civil)*, Cilt 2, Sayı 1, ss. 20-21.
- Meyerhof, G.G., 1965, "Shallow foundations", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions*, Cilt 91, Sayı 2, ss. 21-31.
- OCDI, 2002, *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Tokyo.
- Ordu, E., Özkan, M.T., 2006, "Kazıklı temellerin deprem performanslarının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi", *İTÜ Dergisi*, Cilt 5, Sayı 2, ss. 27-34.
- Osmanoğlu, U., 2021, *Farklı Zemin Gruplarında Tasarlanan Kazıklı Radye Temel Sistemlerinin Statik ve Dinamik Koşullar Altında Deformasyon Tabanlı Optimizasyonu: Kıbrıs Adası Örneği*, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Rahmani, A., Pak, A., 2012, "Dynamic behavior of pile foundations under cyclic loading in liquefiable soils", *Computers and Geotechnics*, Cilt 40, ss. 114-126.
- Sadek, M., Shahrour, I., 2006, "Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 26, Sayı 5, ss. 461-468.
- Taha, A., Naggar, M.H.E., Turan, A., 2015, "Experimental study on the seismic behaviour of geosynthetic-reinforced pile-foundation system", *Geosynthetics International*, Cilt 22, Sayı 2, ss. 183-195.
- TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- TS EN 1991-1-4, 2007, *Yapılar Üzerindeki Etkiler- Bölüm 1-4: Genel Etkiler- Rüzgar Etkileri (Eurocode 1)*, Türk Standardları Enstitüsü, TSE, Ankara.
- TS500, 2000, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standardları Enstitüsü, TSE, Ankara.
- TS498, 1987, *Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri*, Türk Standardları Enstitüsü, TSE, Ankara.
- Uzuoka, R., Sento, N., Kazama, M., Zhang, F., Yashima, A., Oka, F., 2007, "Three-dimensional numerical simulation of earthquake damage to group-piles in a liquefied ground", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 27, Sayı 5, ss. 395-413.
- Yurtseven, H.E., 2018, *Lefke-Doğu (Lefke, KKTC) Kıbrıs Tipi Masif Sülfid Cevherleşmesinin Jeolojisi, Mineralojisi ve Kökeni*, Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Zhan, Y.G., Wang, H., Liu, F.C., 2012, "Modeling vertical bearing capacity of pile foundation by using ABAQUS", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Cilt 17, ss. 1855-1865.



GRAFİT KATKILI SİKLO-OLEFİN KOPOLİMER (COC) KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

¹İbrahim KILINÇ , ²Salih Hakan YETGİN 

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Kütahya, TÜRKİYE

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE
¹gulKent571@gmail.com, ²shakanyetgin@tarsus.edu.tr

(Geliş/Received: 06.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 24.07.2021)

ÖZ: Bu çalışmada, ağırlıkça %5, %15, %30, %45, %60 ve %75 oranlarında grafit katkılı siklo-olefin kopolimer (COC) kompozitleri ekstrüzyon ve basınçlı kalıplama yöntemleri ile üretilmiştir. Sürtünme ve aşınma deneyleri, disk üzerinde pim sistemi (pim-disk) ile kuru ortam şartlarında, 20 N, 30 N ve 40 N yük ve 0.5 m/s, 1.0 m/s ve 1.5 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. COC polimeri ve grafit katkılı COC kompozitlerin artan kayma hızı ve yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı azalmış aşınma oranı ise artmıştır. En düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı %75 grafit katkılı COC kompozitinde elde edilmiştir. COC polimerine eklenen %75 oranındaki grafit katkısı ile sürtünme katsayısı %87.7 oranında, aşınma oranı ise %498.79 oranında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Grafit, Siklo-Olefin Kopolimer (COC), Sürtünme

Investigation of Tribological Properties of Graphite Filled Cyclo-Olefin Copolymer (COC) Composites

ABSTRACT: In this study, 5%, 15%, 30%, 45%, 60%, and 75% graphite filled cyclo-olefin copolymer (COC) polymers have been produced by extrusion and pressure molding technics. Wear and friction tests have been carried out at the sliding speeds of 0.5 m/s, 1.0 m/s and 1.5 m/s, applied loads of 20 N, 30 N, 40 N and under dry conditions using pin-on-disc system. As a result of the experiments, coefficient of friction increases while wear rate decreases with increase both applied load and sliding speed. The lowest coefficient of friction and the wear ratio have been obtained in weight of 75% graphite filled COC composites. The coefficient of friction and wear rate of the 75% graphite filled COC polymer decreased by 87.7% and 498.79%, respectively.

Key Words: Wear, Graphite, Cyclo-Olefin Copolymer (COC), Friction

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üstün mekanik özellikler, yüksek camsı geçiş sıcaklığı (T_g), mükemmel şeffaflık, düşük nem emilimi ve çözücülere karşı iyi direnç sergileyen siklo-olefin kopolimerler (COC), olefinler ile halkalı yapıdaki norbornen gibi monomerlerin kopolimerizasyonundan elde edilen tamamen ya da yüksek orandaki amorf polimerlerdir. COC'lerin fiziksel özellikleri içerdiği halkalı yapıdaki monomerin (norbornen) yapıdaki oranına göre değişmektedir. Yapıdaki norbornen birimlerinin mol veya ağırlık oranına bağlı olarak, COC'ler diğer poliolefin kopolimerlerine kıyasla nispeten yüksek camsı geçiş sıcaklıkları sergiler ve böylece fiziksel özelliklerde önemli bir kayıp olmaksızın uzun süreli kullanım ömrü sağlar. Örneğin;

yapıdaki norbornen oranına bağlı olarak COC'lerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 78 ile 180 °C arasında değişebilmektedir [Akın ve diğ., 2014; Sunanda, 2014].

COC polimerinin farklı tipte inorganik katkıları ile kullanımı, fiziksel ve mekanik özelliklerin incelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur [Yoshinori ve Hiroshi, 2018; Liu ve diğ., 2003; Saravanan ve diğ., 2015; Pal ve diğ., 2016]. O'Neil ve arkadaşları [2016] etilen/norbornen miktarının COC polimerinin yüzey özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, artan norbornen içeriğinde, UV/O₃ veya O₂ plazma ile aktive edildiğinde, alkoller, ketonlar, aldehitler ve karboksil gruplar gibi daha fazla oksijen içeren fonksiyonların oluşmasına sebep olduğu belirtilmiştir. ~%60 norbornen içerikli COC polimerinin, UV/O₃ veya O₂ plazma aktivasyonunu takiben %50 norbornen içerikli COC ve %35 norbornen içerikli COC ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek -COOH fonksiyonel grup yoğunluğu gösterdiği belirlenmiştir. Lai ve arkadaşları [2015] termal olarak indirgenmiş grafen oksit (TRGO) katkılı COC nanokompozit filmlerin yüksek su buharı bariyer özelliği gösterdiklerini belirtmişlerdir. Ağırlıkça %0.06 TRGO içeriğinde COC nanokompozit filmlerin su buharı geçirgenliğinin %21 oranında azaldığı belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan TRGO miktarı ile su buharı geçirgenliğinin, aynı orandaki polimer/kil ve polimer/grafen nanokompozitlerinkinden 10-100 kat daha düşük olduğu belirlenmiştir. Merve ve Ercan [2016] grafit (G), grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksit (rGO) katkılı COC nanokompozit filmlerin fiziksel ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, rGO içeren nanokompozit filmlerin dağılmış (exfoliated) yapı gösterdiği, G ve GO esaslı nanokompozitlerin ise tabakalı (intercalated) yapı gösterdiği belirtilmiştir. Tüm nanokompozit filmlerin COC polimeri ile karşılaştırıldığında daha yüksek gaz bariyer performansı gösterdiği belirlenmiştir. Akın ve arkadaşları [2014] farklı oranlarda tekli ve ikili karbon fiber (CF) ve genişletilmiş grafit (EG) dolgulu COC kompozitlerin mikro-yapısal ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Kullanılan dolguların karbon esaslı olmalarına rağmen, farklı geometrik yapıları ve fiziksel özellikleri nedeniyle polimer içinde farklı dağılım gösterdikleri ve kompozitlerin mekanik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine etkilerinin farklı olduğu belirtilmiştir. Malzemenin elektriksel iletken haline geldiği kritik dolgu miktarı olarak tanımlanan "elektriksel perkolasyon" miktarları CF ve EG için sırasıyla 30phr ve 20phr olarak belirlenmiştir. Sunanda ve arkadaşları [2014] nanosilika katkılı COC kompozitlerin fiziksel, mekanik, dinamik-mekanik, termal, tribolojik ve optik özellikleri üzerine farklı oranlardaki (ağırlıkça %1, 2, 3 ve 5) nanosilikanın etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, %3 nanosilika katkılı COC kompozitin %5 nanosilika katkılıya göre daha iyi dağılım gösterdiği için en yüksek çekme dayanımı (55.6MPa) gösterdiği belirtilmiştir. Katkısız COC polimerinin 184°C olan camsı geçiş sıcaklığı (T_g), %3 nanosilika katkılı COC kompoziti için 194.3 °C elde edilmiştir. COC polimerine farklı oranlarda ilave edilen nanosilika katkısının rijitliği ve sertliği artırarak yüksek çizilme direnci ve düşük sürtünme katsayısı sağladığı belirtilmiştir. Nanokompozitlerin, katkısız COC filmlere benzer optik özellikler gösterdiği belirtilmiştir. Ou ve Hsu [2007] ağırlıkça %1, 5, 10 ve 15 oranlarında SiO₂ katkılı COC kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. COC kompozitlerin camsı geçiş sıcaklığının katkısız COC polimerine göre 20°C arttığı, %15 SiO₂ içeriğinde bozunma sıcaklığının ise 13°C arttığı belirtilmiştir. %10 SiO₂ içeriğinde ışık geçirgenliğinin hala %85 üzerinde olduğu aynı zamanda COC kompozitlerin oksijen bariyer özelliğinin önemli oranda geliştiği belirtilmiştir. Benzer sonuçlar, Ou ve Hsu [2008] tarafından yapılan TiO₂ katkılı COC kompozit numunelerinde de elde edilmiştir. Kasgoz ve arkadaşları [2014a] farklı oranlarda karbon siyahı, karbon fiber, grafit ve genişletilmiş grafit gibi karbon esaslı katkıların COC polimerinin morfolojik, mekanik ve reolojik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Taramalı elektron mikroskopu çalışmaları sonucunda katkıların geometrik özelliklerine bağlı olarak polimer matris içerisinde katkı dağılımının farklılaştığı ve kompozit oluşumunda arayüzey ajanı veya uyumlaştırıcı olmaması sebebiyle katkıları ve COC arasında zayıf arayüzey elde edildiği belirtilmiştir. Karbon siyahı ve genişletilmiş grafitin yüksek yüzey alanı ve aglomera olmuş yapısı nedeniyle grafit ve karbon fiberden daha yüksek ergiyik viskozitesine sahip olduklarını belirtmişlerdir. Kasgoz ve arkadaşlarının [2012a] maleik anhidrit aşılı polietilen (PE-g-MA) ve polietilen co-1-okten (PEO) uyumlaştırıcılarını kullanarak ürettikleri organo-kil katkılı COC nanokompozitlerin reolojik ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda perkolasyon miktarı ve en/boy oranının 0.018 ve 12-15 elde edilmiştir. COC kompozitlere ilave edilen PEO uyumlaştırıcının ergiyik ve katı hal durumlarında

depolama modülünü artırdığı, organo-kil dağılımını geliştirdiği ancak şeffaflığın kötüleştiği belirtilmiştir. Kasgoz ve arkadaşları [2014b] yaptıkları diğer bir çalışmada ise karbon siyahı ve karbon fiber katkıli COC kompozitlerin elektrik ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Reolojik ölçümler sonucunda, yüksek yüzey alanı ve nano-partikül boyutu nedeniyle, dinamik viskozite ve ergiyik elastikiyeti gibi viskoelastik parametreleri geliştirmek için karbon siyahının karbon fiberden daha etkili bir katkı elemanı olduğunu belirtmişlerdir. Reolojik perkolasyon miktarları karbon siyahı ve karbon elyaf için 9.4phr ve 15phr olarak elde edilmiştir. Elektrik perkolasyon miktarları ise her iki katkı içinde 15phr olarak elde edilmiştir. Maksimum elektrik iletkenliği 40phr karbon siyahı ve karbon elyaf için sırasıyla 10-2 ve 10-1 S/cm olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde Motlagh ve arkadaşları da [2007] karbon siyahı ve karbon fiber katkıli COC kompozitlerin elektrik ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kasgoz ve arkadaşları [2012b] grafit ve genişletilmiş grafit katkıli COC kompozitlerin reolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada, lineer viskoelastik bölgede, katkı miktarına bağlı olarak depolama modülünün (G') arttığı ve perkolasyon miktarının grafit ve genişletilmiş grafit için sırasıyla 21.5phr ve 3.8phr olduğu belirtilmiştir. Grafit katkıli COC kompozitlerin yüksek performanslı iletken kompozit uygulamalarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

COC'ler özellikle kamera ve fotoğraf makinelerinin lensleri, kontak lensler, CD ve DVD lensleri gibi optik geçirgenlik gerektiren alanlarda, yırtılma dayanımının belirli bir düzeyde, gaz ve su buharı geçirgenliği değerlerinin çok düşük olması istenen ilaç ambalajlama gibi sektörlerde, yüksek mekanik ve termal dayanım isteyen parçalarda otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. COC'ler termal, optik ve mekanik özellikleri açısından birçok alanda yaygın olarak kullanılan polikarbonat (PC) ile benzer özellik göstermektedir. Ancak polikarbonatların sağlık açısından önemli tehditler içeren bisfenol-A içermesi özellikle gıda ve tıp alanında bu malzemelerin tercih edilmemesine neden olmaktadır. Bu şekilde herhangi bir sağlık açısından risk oluşturacak bir kimyasal barındırmayan COC'ler günümüzde yaygın kullanılan polikarbonatlar için de en uygun malzeme alternatifini oluşturmaktadır. COC'nin optik özellikleri poli(metilmetakrilat)'a (PMMA) benzerdir, fakat ısıl özellikleri PMMA'den çok daha iyidir. Ayrıca COC'nin nem absorpsiyonu PMMA'inkinden 10 kat daha azdır. Sertlik özellikleri değerlendirildiğinde COC'nin, polikarbonattan (PC) yaklaşık %75 daha sert olduğu bilinmektedir [Ou ve Hsu, 2007; Saravanan ve diğ., 2015; Sunanda ve diğ., 2014].

COC polimeri sadece mükemmel ısıl ve mekanik özellikleri için değil, aynı zamanda sürtünme ve aşınmanın azaltılması için de farklı endüstrilerde potansiyel uygulamalar bulabileceği tahmin edilmektedir. Literatür taramasına göre grafit katkıli COC polimerlerin tribolojik özelliklerini araştıran herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, grafit katkıli COC kompozitler ekstrüzyon ve basınçlı kalıplama yöntemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Grafit ilavesinin COC polimerin sürtünme ve aşınma davranışına etkisinin yanında yük ve kayma hızının etkisi de araştırılmıştır. 0.5, 1.0 ve 1.5 m/s kayma hızlarında ve 20, 30 ve 40 N yüklerde kuru koşullarda oda sıcaklığında AISI 1040 çelik diske karşı pim-disk sistemi kullanılarak tribolojik testler yapılmıştır.

DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Polimer matris olarak Ticona tarafından Topas® 6013 ticari adı ile üretilen siklo-olefin kopolimer (COC) kullanılmıştır. Kullanılan polimerin bazı fiziki özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Katkı malzemesi olarak ise Nanokar Kimyevi Maddeler San.ve Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilen %99 saflıktaki ve 44 mikron altı toz boyutuna sahip grafit tozu kullanılmıştır.

Grafit katkıli COC kompozitler eriyik harmanlama yöntemine göre Gülnar marka, 16 mm vida çaplı, 640 mm vida uzunluğunda ($L/D=40$), vida konfigürasyonu ayarlanabilir (segmented screw) eş yönlü (co-rotating) ve iç-içe dönen (intermeshing) çift vidalı ekstruderde hazırlanmıştır. Örnekler hazırlanmadan önce grafit ve COC polimeri 60 °C de 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Daha sonra "polimer-dolgu" kuru karışımı olarak belirlenen bileşim oranına göre tartılan örnekler ekstruderden geçirilerek kesicide granül haline getirilmiştir. Ekstruder kovan sıcaklıkları girişten kafa çıkış bölgesine (die) doğru 185-200-220-220 °C olarak ayarlanmıştır. Hazırlanan kompozitlerin örnek tanımlama kodları ve bileşimleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan siklo-olefin kopolimerin (Topas® 6013) fiziksel özellikleri*Table 1. Physical properties of the cyclo-olefin copolymer (Topas® 6013)*

Camsı geçiş sıcaklığı (T _g) (°C)	140
MVR ^a (ml/10dak.)	14
HDT ^b (°C)	130
Yoğunluk (g/cm ³)	1.02
Kopma uzaması (%)	2.7
Işık geçirgenlik (%)	91
^a Hacimsel eriyik akış sayısı (ISO 1133, 260 °C, 2.16 kg)	
^b Isıl deformasyon sıcaklığı (0.45 MPa)	

Çizelge 2. Hazırlanan grafit katkılı COC kompozitlerin bileşimleri*Table 2. The compositions of the graphite-filled COC composites*

Numuneler	COC	Grafit (% ağırlıkça)
COC	100	0
G5		5
G15		15
G30		30
G45		45
G60		60
G75		75

Belirtilen bileşimlerde hazırlanan kompozitlerden daha sonra sıcak ve soğuk presler kullanılarak sürtünme ve aşınma deneyleri için plaka halinde oluşturulan deney numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 1’de kullanılan sıcak ve soğuk presler ile üretim sonrası elde edilen numune resimleri verilmiştir. Karşı disk olarak Ç1040 çeliği kullanılmıştır. Tüm deneyler kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney malzemelerin sürtünme katsayısı testlerinin uygulama prensibi şu şekilde özetlenebilir; kullanılan disk malzemeleri, tahriki elektrik motorundan sağlanan diskin üzerine vida kullanılarak yerleştirilmiştir. Plaka şeklindeki pim deney kompozit malzemeleri kolda yerleşik bir mekanizma ile kola sabitlenmiştir. Numune test edilmeye başlandığında, pimlerin diske sürtünmesiyle, kol aparatı da diskin dönme yönüne doğru hareket edecektir. Eşitlik 1’de verilen yanal sürtünme kuvveti (F_s), ileriye doğru olan hareketi ifade etmektedir. Bu yanal kuvvet ise bir yük hücresi ile ölçülmektedir. Alınan veriler direk olarak cihaza bağlanan entegre bilgisayarda Excel programında depolanmıştır. Dakikada 1000 tane yanal yük verisi alınmıştır. Yanal yükler deneylerde kullanılan yüke bölünerek hesaplanmıştır. Bu işlem Microsoft Excel üzerinde hesaplanarak grafik haline getirilmektedir. Sürtünme katsayısı, yanal kuvvetin uygulanan normal kuvvete oranıdır ve sürtünme katsayısının hesaplanmasında ise Eşitlik 1’den yararlanılmıştır. Burada; F_s:Yanal sürtünme kuvveti (N), μ: Sürtünme katsayısını, F_n: ise Normal kuvveti (N) temsil etmektedir.

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (1)$$

Testlerde, 20 N, 30 N ve 40 N olmak üzere 3 farklı yük ile 0.5, 1.0 ve 1.5 m/s olmak üzere 3 farklı kayma hızı kullanılmıştır. Kayma mesafesi 1000 m olarak seçilmiştir. Her testten önce (m₁) ve sonra (m₂) numune ağırlıkları, Şekil 2’de resmi verilen, kapasitesi 220 g ve hassasiyeti 0,0001 g olan SHIMADZU AUX-320 terazi kullanılarak belirlenmiştir. Böylelikle ağırlık kaybı (Δ_m) tespit edilmiştir. Eşitlik 2 ile aşınma oranları (K₀) hesaplanmıştır. Burada; S: Kayma mesafesi (m), Δ_m: Ağırlık kaybı (g), p: Malzemelerin yoğunluğu (g/cm³), F: Uygulanan yükü (N) ifade eder.

$$K_0 = \frac{\Delta m}{s\rho F} \quad (2)$$

Aşınma-sürtünme deneyleri, Şekil 3'te resmi verilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi laboratuvarlarında bulunan pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda karşı disk yüzeyleri ise Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi (İLTEM) laboratuvarında bulunan ECLIPSE Ci-E kodlu Nikon marka optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



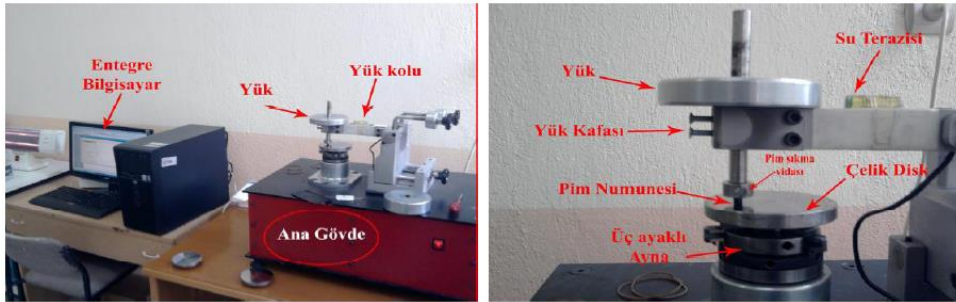
Şekil 1. Sıcak ve soğuk presler ile üretim sonrası elde edilen numuneler

Figure 1. Hot and cold press, and post-production samples



Şekil 2. Yoğunluk test cihazı

Figure 2. Density device



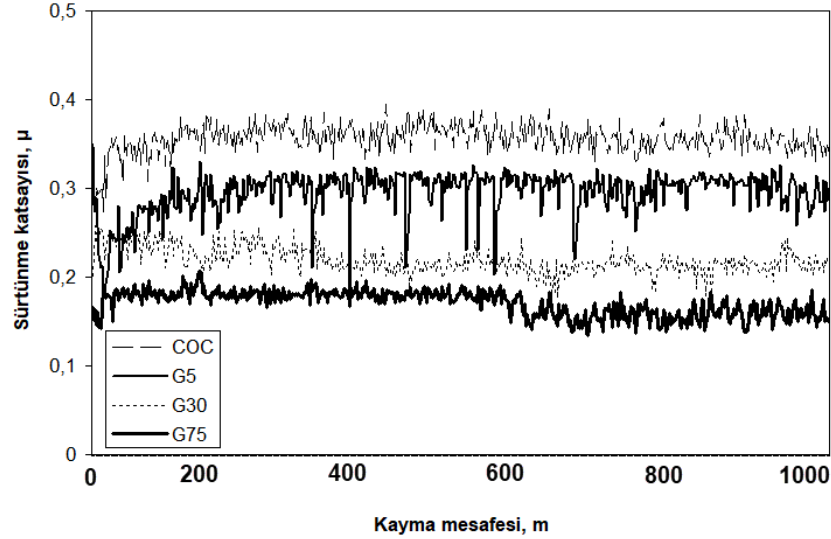
Şekil 3. Aşınma cihazı

Figure 3. Wear device

DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Şekil 4'te 1.5 m/s kayma hızı ve 20 N yük altında COC polimeri ile COC kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma mesafesi ilişkisi verilmiştir. Grafik incelendiğinde sürtünme katsayısındaki değişimin başlangıç aşaması ve kararlı hal aşaması olmak üzere iki aşamada gerçekleştiği belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı başlangıçta artarken daha sonra 100 m civarlarında kararlı hal geçmiştir. COC polimerine ilave edilen grafit sürtünme katsayısını önemli bir oranda azaltmıştır. Karbonun üç formundan birisi olan grafit, her bir tabakasındaki hegzagonal birim hücrede düzenlenmiş atomların bulunduğu katmanlı bir yapıya sahiptir. Zayıf van der Waals bağları ile birbirine bağlı olan bu katmanlar, kayma koşulları altında

kesme kuvveti ile kolayca kırılıp karşı yüzeyde bir transfer filmi oluştururlar. Grafit ilavesi ile temas yüzeyi üzerindeki grafit miktarı artmıştır. Artan grafit miktarı ile bu tabakalar karşı disk yüzeyinde homojen bir şekilde şekillenmiş ve numune ile karşı disk arasındaki teması kesen transfer film tabakasını oluşturmuş ve bunun sonucu olarak sürtünme katsayısı azalmıştır [Recep ve Erol, 2019; Shang ve diğ., 2018].



Şekil 4. Katkısız COC ve grafit katkı COC kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma mesafesi ilişkisi (kayma hızı: 1.5 m/s, uygulanan yük: 20 N).

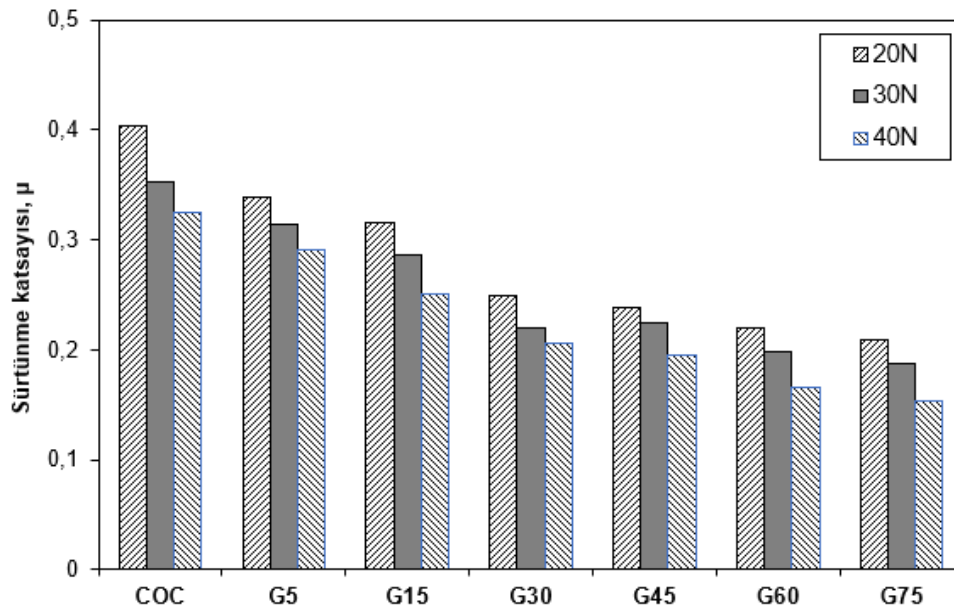
Figure 4. Coefficient of friction-sliding distance relationship of neat COC and graphite-filled COC composites (sliding speed: 1.5 m/s, applied load: 20 N).

Çizelge 3'te katkısız COC polimeri ile farklı oranlarda grafit katkı COC kompozitlerin kayma hızı ve yüke bağlı olarak sürtünme katsayılarındaki değişim verilmiştir. Şekil 5'te ise 1.0m/s kayma hızında, katkısız COC ve grafit katkı COC kompozitlerin uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, uygulanan yükün artması ile birlikte sürtünme katsayısı azalmıştır. 20 N yük altında COC polimerinin 0.4042 olan sürtünme katsayısı değeri 40 N yük altında %24 oranında azalarak 0.3251 elde edilmiştir. Benzer sonuçlar grafit katkı COC kompozitlerinde de elde edilmiştir. Yükün artması ile birlikte, G5, G15, G30, G45, G60 ve G75 kompozitlerin sürtünme katsayıları sırasıyla %16.84, %25.56, %20.22, %22.49, %32.46 ve %35.86 oranlarında azalmıştır. Yükün artması ile sürtünme ısısı nedeniyle temas sıcaklığı genellikle artacaktır. Artan bu ara yüzey sıcaklığı polimer matrisi yumuşatarak kayma gerilimini azaltacaktır ve böylelikle sürtünme katsayısı azalacaktır [Sudheera ve diğ., 2014]. Artan grafit miktarıyla birlikte sürtünme katsayısı önemli oranda azalmıştır. 30 N sabit yük altında, sürtünme katsayısındaki azalma, %12.4, %23.2, %60.2, %57.5, %77.6 ve %87.7 oranlarında elde edilmiştir. Yük ve kayma hızı aralıklarında, en yüksek sürtünme katsayısı 0.5 m/s hızda ve yük 20 N altında saf COC polimerinde elde edilirken, en düşük sürtünme katsayısı 1.5 m/s hızda, 40 N yük altında %75 grafit katkı COC kompozitinde elde edilmiştir. Şekil 6'da ise 30 N yük altında, katkısız COC polimeri ile grafit katkı COC kompozit numunelerin kayma hızı ile sürtünme katsayısı arasındaki değişim verilmiştir. Şekil incelediğinde, artan kayma hızı ile birlikte sürtünme katsayısı azalmıştır. Katkısız COC polimer malzemesi için sürtünme katsayısı 30 N'da 0.5 m/s hız altında 0.4012 iken hız değeri 1.5 m/s'ye artırılınca sürtünme katsayısı %22.35 oranında azalarak 0.3279 olarak elde edilmiştir. Farklı oranlarda grafit katkı COC kompozitlerinde, sırasıyla, %30.62, %46.49, %69.15, %55.43, %68.42 ve %30.10 oranlarında sürtünme katsayısı azalmıştır. Benzer sonuçlar Roy ve arkadaşları [Sunanda ve diğ., 2014] tarafından yapılan nanosilika katkı COC kompozitinde elde edilmiştir. Artan nanosilika miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısının azaldığı bunun sebebinin ise artan dayanım, rijitlik ve çizilme direnci olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 3. Grafit katkılı COC kompozitlerin sürtünme katsayısı sonuçları

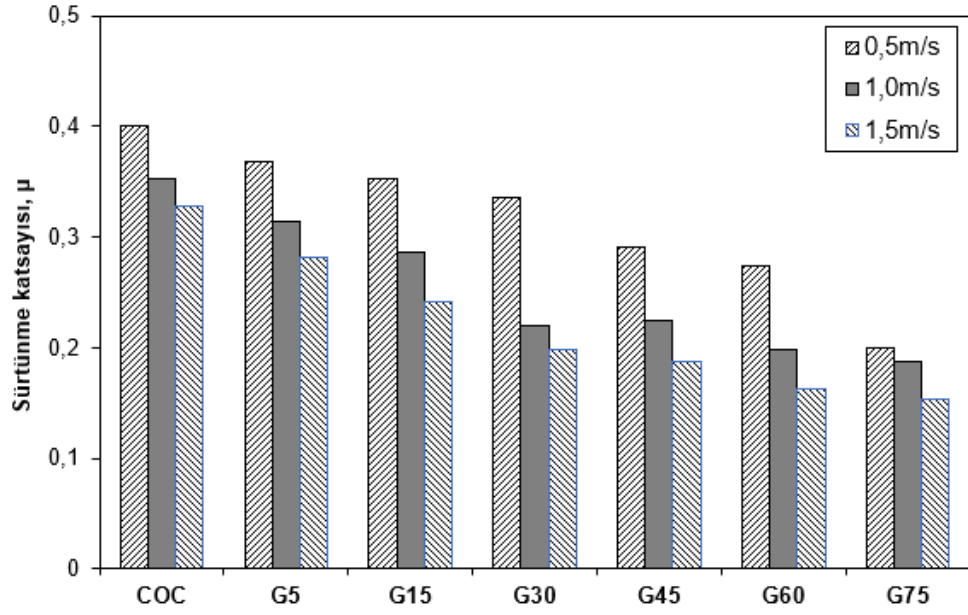
Table 3. Results of the coefficient of friction of graphite filled COC composites

Malzeme	Yük, N	Sürtünme katsayısı, μ		
		Kayma hızı, m/s		
		0.5	1.0	1.5
COC	20	0.4372	0.4042	0.3632
	30	0.4012	0.3533	0.3279
	40	0.3681	0.3251	0.2946
G5	20	0.4054	0.3392	0.3045
	30	0.3681	0.3143	0.2818
	40	0.3344	0.2903	0.2658
G15	20	0.3762	0.3153	0.2656
	30	0.3529	0.2866	0.2409
	40	0.3112	0.2505	0.2179
G30	20	0.3538	0.2485	0.2161
	30	0.3351	0.2205	0.1981
	40	0.2734	0.2067	0.1864
G45	20	0.3081	0.2385	0.2074
	30	0.2905	0.2243	0.1869
	40	0.2427	0.1947	0.1662
G60	20	0.2905	0.2191	0.1754
	30	0.2742	0.1989	0.1628
	40	0.2284	0.1654	0.1501
G75	20	0.2419	0.2091	0.1673
	30	0.2001	0.1882	0.1538
	40	0.1702	0.1539	0.1352



Şekil 5. Katkısız COC ve grafit katkılı COC kompozitlerin uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı grafiği (Kayma hızı: 1.0 m/s)

Figure 5. Friction coefficient of neat COC and graphite-filled COC composites depending on the applied load (Sliding speed: 1.0 m/s)



Şekil 6. Katkısız COC ve grafit katkılı COC kompozitlerin uygulanan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı grafiği (Yük: 30 N)

Figure 6. Friction coefficient of neat COC and graphite-filled COC composites depending on the sliding speed (applied load: 20N)

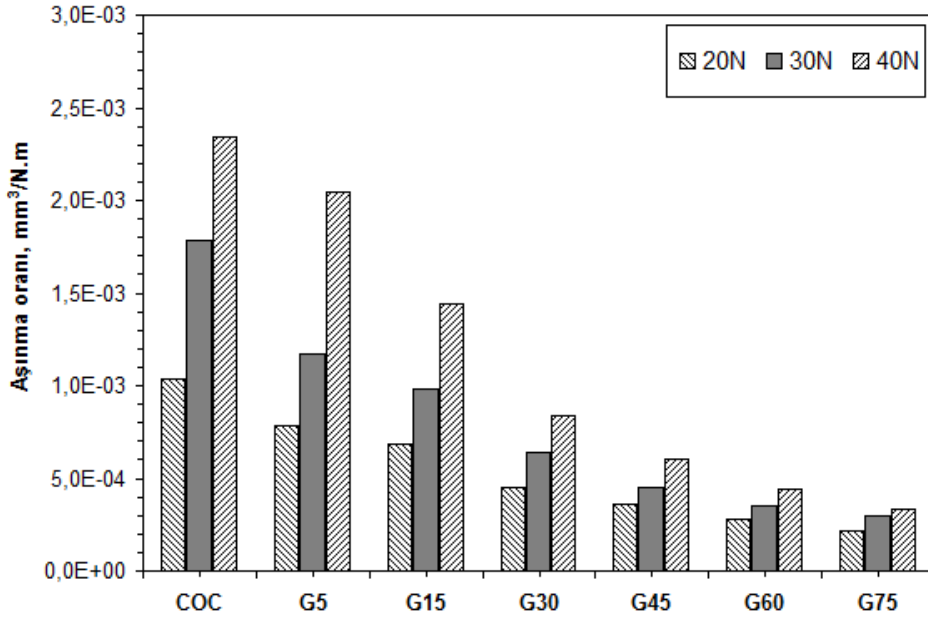
Çizelge 4’te katkısız COC polimeri ile farklı oranlarda grafit katkılı COC kompozitlerin kayma hızı ve yüke bağlı olarak aşınma oranlarındaki değişim verilmiştir. Şekil 7’de katkısız COC polimeri ile grafit katkılı COC kompozitlerinin 1.0 m/s kayma hızında, 20 N, 30 N, 40 N yüke karşı aşınma oranındaki değişim gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde genel olarak yük artışı ile aşınma oranının da arttığı belirlenmiştir. Katkısız COC polimerinin aşınma oranı, yükün 20 N’dan 40 N’a çıkması ile %125.0 oranında artmıştır. Yükün 20 N’dan 40 N’a çıkması ile grafit katkılı COC kompozitlerinde aşınma oranları ise %161.53, %110.75, %86.11, %68.51 ve %61.97 %51.76 oranlarında artmıştır. COC polimerine ilave edilen grafit katkısı aşınma oranının önemli oranda azalmasına sebep olmuştur. Bu azalma grafit miktarına göre %52.54, %80.82, %178.56, %294.97, %412.58 ve %498.79 oranlarında gerçekleşmiştir. Benzer bir sonuç Xintao ve arkadaşları [2008] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Artan grafit miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, grafitin karşı disk yüzeyinde transfer film tabakası oluşturan katı yağlayıcılardan birisi olduğu belirtilmiştir. Artan grafit miktarı ile kayma yüzeyi üzerinde şekillenen grafit miktarının arttığı ve disk yüzeyi ile polimer arasında teması keserek sürtünme katsayısının ve aşınma miktarının azaldığı belirtilmiştir. COC polimeri ile grafit katkılı COC kompozitlerin 1.0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altındaki aşınma testleri sonucu elde edilen karşı disk yüzey görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm numuneler için disk yüzeyinde transfer film tabakasının (TFT) oluştuğu belirlenmiştir. Katkısız COC polimerinde oluşan film tabakasının bölgesel olarak ve düzensiz bir şekilde oluştuğu gözlenirken artan grafit miktarı ile transfer film tabakasının disk yüzeyinin neredeyse tamamını kapsadığı ve daha düzenli oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu transfer film tabakası polimer numune ile disk yüzeyi arasındaki teması keserek sürtünme katsayısının azalmasına ve aşınma direncinin artmasında etkili olmuştur.

Genel olarak, COC polimerine ilave edilen grafitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranına etkisi incelendiğinde, artan grafit miktarı ile sürtünme katsayısının azaldığı ve aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir. Grafit miktarının oranı aşınma ve sürtünmede çok önemli bir katkı maddesi olduğu görülmüştür. Bunun yanında uygulanan kuvvet ve kayma hızının da aşınma ve sürtünmeyi etkilemiş ancak aşınma ve sürtünme özellikleri üzerine en etkili parametrenin kullanılan katkı ve miktarı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4. Grafit katkılı COC kompozitlerin aşınma oranları sonuçları

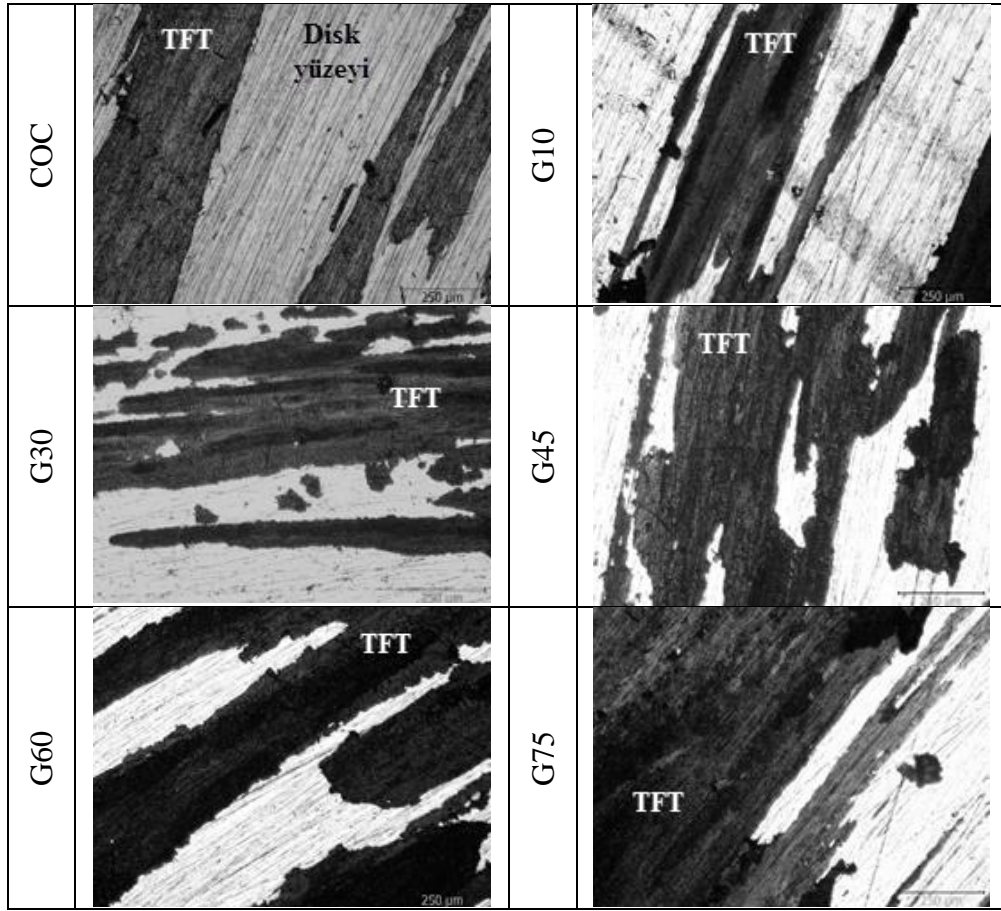
Table 4. Results of the wear rate of graphite filled COC composites

Malzeme	Yük, N	Aşınma oranı, mm ³ /N.m		
		Kayma hızı, m/s		
		0.5	1.0	1.5
COC	20	8.87E-04	1.04E-03	1.40E-03
	30	1.18E-03	1.78E-03	1.91E-03
	40	1.90E-03	2.34E-03	2.49E-03
G5	20	6.84E-04	7.81E-04	1.04E-03
	30	9.43E-04	1.17E-03	1.30E-03
	40	1.52E-03	2.04E-03	2.14E-03
G15	20	5.76E-04	6.85E-04	8.97E-04
	30	7.54E-04	9.85E-04	1.14E-03
	40	8.93E-04	1.44E-03	1.97E-03
G30	20	3.84E-04	4.53E-04	6.54E-04
	30	5.89E-04	6.39E-04	7.50E-04
	40	6.56E-04	8.42E-04	1.16E-03
G45	20	2.85E-04	3.58E-04	4.08E-04
	30	4.07E-04	4.51E-04	6.08E-04
	40	4.89E-04	6.03E-04	8.06E-04
G60	20	2.06E-04	2.75E-04	3.21E-04
	30	3.07E-04	3.47E-04	4.30E-04
	40	3.97E-04	4.45E-04	5.08E-04
G75	20	1.05E-04	2.18E-04	2.44E-04
	30	1.49E-04	2.97E-04	3.28E-04
	40	2.03E-04	3.31E-04	3.76E-04



Şekil 7. Katkısız COC ve grafit katkılı COC kompozitlerin uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranı grafikleri (Kayma hızı:1.0 m/s)

Figure 7. Wear rate of neat COC and graphite-filled COC composites depending on the applied load (Sliding speed: 1.0 m/s)



Şekil 8. Katkısız COC ve grafit katkı COC kompozitlerin disk resimleri
(kayma hızı: 1.0 m/s, uygulanan yük: 20 N, x100).

Figure 8. Optical disc figures of neat COC and graphite-filled COC composites (sliding speed: 1.0 m/s, applied load: 20 N, x100).

SONUÇLAR (RESULTS)

Farklı oranlarda grafit katkı COC kompozitlerinin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Uygulanan yükün ve kayma hızının artması ile sürtünme katsayısı azalmıştır. Artan grafit miktarıyla birlikte sürtünme katsayısında azalma aşınma oranlarında ise artış görülmüştür. Grafit miktarının aşınma ve sürtünmede çok önemli bir etken olduğu görülmüştür. COC polimerine eklenen %75 oranındaki grafit katkısı ile sürtünme katsayısı %87.7 aşınma oranı ise %498.79 oranında azalmıştır. Düşük sürtünme katsayısı ve grafitin yüksek yük taşıma kapasitesi, grafit katkı COC kompozitlerin kuru kayma şartları altında tribolojik özelliklerinin gelişmesinde etkili olmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akın, D., Alper, K., Ali, D., 2014, "Quantifying microstructure, electrical and mechanical properties of carbon fiber and expanded graphite filled cyclic olefin copolymer composites", Composites: Part A, Cilt 60, ss. 44-51.
- Kasgoz, A., Dincer, A., Ali, D., 2012a, "Rheological and mechanical properties of cycloolefin copolymer/organoclay nanocomposites", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Cilt 31, Sayı 20, ss. 1329-1341.
- Kasgoz, A., Akın, D., Ali, D., 2012b, "Rheological Behavior of Cycloolefin Copolymer/Graphite Composites", Polymer Engineering & Science, Cilt 52, Sayı 12, ss. 2645-2653.

- Kasgoz, A., Dincer, A., Ali, I. A., Ali, D., 2014a, "Effect of different types of carbon fillers on mechanical and rheological properties of cyclic olefin copolymer (COC) composites", *Composites: Part B*, Cilt 66, ss. 126–135.
- Kasgoz, A., Akin, D., Ali, D., 2014b, "Rheological and electrical properties of carbon black and carbon fiber filled cyclic olefin copolymer composites", *Composites: Part B*, Cilt 62, ss. 113–120.
- Lai, C. L., Ywu-Jang, F., Jung-Tsai, C., Da-Ming, W., Yi-Ming, S., Shu-Hsien, H., Wei-Song, H., Chien-Chieh, H., Kueir-Rarn, L., 2015, "Composite of cyclic olefin copolymer with low graphene content for transparent water-vapor barrier films", *Carbon*, Cilt 90, ss. 85–93.
- Liu, C., Jian, Y., Xinghua, S., Jun, Z., Jiasong, H., 2003, "Thermal degradation studies of cyclic olefin copolymers", *Polymer Degradation and Stability*, Cilt 81, ss. 197–205.
- Merve, D., Ercan, N., 2016, "Effect of Graphitic Nano-Sheets on the Physical Properties of Cyclic Olefin Copolymer Composite Films", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Cilt 55, Sayı 10, ss. 1021-1029.
- Motlagh, G. H., Hrymak, A. N., Thompson, M. R., 2007, "Properties of a Carbon Filled Cyclic Olefin Copolymer", *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Cilt 45, ss. 1808–1820.
- O'Neil, C. E., Scott, T., Kumuditha, R., Swathi, P., Varshni, S., Steven, A. S., 2016, "Characterization of Activated Cyclic Olefin Copolymer: Influence of the Ethylene/Norbornene Content on the Physiochemical Properties", *Analyst*, Cilt 28, sayı 141(24), ss. 6521-6532.
- Ou, C. F., Hsu, M. C., 2007, "Preparation and characterization of cyclo olefin copolymer (COC)/silica nanoparticle composites by solution blending", *Journal of Polymer Research*, Cilt 14; ss. 373–378.
- Ou, C. F., Hsu, M. C., 2008, "Preparation and Properties of Cyclo-Olefin Copolymer/Titania Hybrids", *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt 110, ss. 732–737.
- Pal, P., Mrinal, K., K., Anirban, M., Asish, M., Chapal, K. D., 2016, "Synergistic Effect of Halloysite Nanotubes and MA-g-PE on Thermo-Mechanical Properties of Polycarbonate-Cyclic Olefin Copolymer Based Nanocomposite", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Cilt 55, Sayı 14, ss. 1481–1488.
- Recep, İ., Erol, F., 2019, "Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf lar ve Dolgu Maddeleri", *El-Çezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 6, Sayı 2, ss. 355-381.
- Saravanan, S., Praveen, C. R., Giridhar, M., 2015, "Effects of temperature and clay content on water absorption characteristics of modified MMT clay/cyclic olefin copolymer nanocomposite films: Permeability, dynamic mechanical properties and the encapsulated organic device performance", *Composites: Part B*, Cilt 73, ss. 1–9.
- Shang, Y., Yunping, Z., Yifan, L., Ye, Z., Zhenhua, J., Haibo, Z., 2018, "The effect of micron-graphite particle size on the mechanical and tribological properties of PEEK Composites", *High Performance Polymers*, Cilt 30, Sayı 2, ss. 153–160.
- Sudheera, M., Hemantha, K., Rajua, K., Thirumaleshwara, B., 2014, "Enhanced Mechanical and Wear Performance of Epoxy/glass Composites with PTW/Graphite Hybrid Fillers", *Procedia Materials Science*, Cilt 6, ss. 975-987.
- Sunanda, R., Tanya, D., Chee, Y. Y., Xiao, H., 2014, "Transparent cyclic olefin copolymer/silica Nanocomposites", *Polymer International*, Cilt 63, ss. 327–332.
- Yoshinori, H., Hiroshi, I., 2018, "Structural Formation of Cyclic Olefin Copolymer (COC) Films as Revealed by Real Time Retardation Measurements during Fast Stretching Process", *Technologies*, Cilt 6, Sayı 60, ss. 1-11.
- Xintao, Z., Gongxiong, L., Qifeng, J., Xuebin, F., Xigao, J., 2008, "On dry sliding friction and wear behavior of PPEsk filled with PTFE and graphite", *Tribology International*, Cilt 41, ss. 195-201.



HYBRID THE ARITHMETIC OPTIMIZATION ALGORITHM FOR CONSTRAINED OPTIMIZATION PROBLEMS

Emine BAŞ 

Kulu Vocational School, Selçuk University, 42075, Konya, TURKEY
emineozcan@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 27.03.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.07.2021)

ABSTRACT: Since many real-world problems can be designed as optimization problems, heuristic algorithms are increasingly preferred by researchers. The Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) is a newly developed heuristic algorithm. It uses four arithmetic operations in its structure. The addition and subtraction operators enhanced the AOA's local search capability, while the multiplication and division operators enhanced the AOA's global search capability. It has been hybridized with the Tree Seed Algorithm (TSA) to increase the success of AOA. Thus, hybrid AOA-TSA (HAOA) has been proposed. The seed production mechanism of TSA is placed in the random walking stage of AOA. New candidate solutions (seeds) have been produced with the arithmetic operators involved in AOA and the candidate solutions have been compared with the existing solutions. Thus, the performance of AOA has increased. In this study, the success of AOA and HAOA was tested in thirteen constrained optimization problems. The success of AOA and HAOA has been tested for their performance in six different population sizes. The Wilcoxon Signed-Rank test was applied to the obtained results and its success has been proved statistically. The results proved the superiority of HAOA. HAOA has been compared with other heuristic methods in the literature and the success of HAOA has been shown. Additionally, AOA and HAOA have also been tested on three different engineering design problems. The results are discussed and evaluated.

Keywords: Constrained optimization, Arithmetic optimization algorithm, Tree Seed Algorithm

Kısıtlı Optimizasyon Problemleri İçin Hibrit Aritmetik Optimizasyon Algoritması

ÖZ: Pek çok gerçek dünya problemi optimizasyon problemleri olarak tasarlanabildiğinden, sezgisel algoritmalar araştırmacılar tarafından giderek daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA), yeni geliştirilmiş bir sezgisel algoritmadır. Yapısında dört aritmetik işlem kullanır. Toplama ve çıkarma operatörleri, AOA'nın yerel arama kabiliyetini geliştirirken, çarpma ve bölme operatörleri AOA'nın küresel arama kabiliyetini geliştirmiştir. AOA'nın başarısını artırmak için Ağaç Tohum Algoritması (TSA) ile hibritlenmiştir. Bu çalışmada, Hibrit AOA-TSA (HAOA) önerilmiştir. TSA'nın tohum üretim mekanizması, AOA'nın rastgele yürüme aşamasına yerleştirilmiştir. AOA'da yer alan aritmetik operatörler ile yeni aday çözümler (tohumlar) üretilmiş ve aday çözümler mevcut çözümlerle karşılaştırılmıştır. Böylece, AOA'nın performansı artmıştır. Bu çalışmada, AOA ve HAOA'nın başarısı on üç kısıtlı optimizasyon probleminde test edilmiştir. AOA ve HAOA'nın başarısı altı farklı popülasyon büyüklüğünde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara Wilcoxon Signed-Rank testi uygulanmış ve başarısı istatistiksel olarak kanıtlanmıştır. Sonuçlar HAOA'nın üstünlüğünü kanıtlamıştır. HAOA, literatürdeki diğer sezgisel yöntemlerle karşılaştırılmış ve HAOA'nın başarısı gösterilmiştir. Ek olarak, AOA ve HAOA, üç farklı mühendislik tasarım probleminde de test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kısıtlı optimizasyon, Aritmetik optimizasyon algoritması, Ağaç tohum algoritması

1. INTRODUCTION

The use of optimization in real-world problems is increasing in the literature. There are different types of optimization. For example, continuous and discrete optimization, constrained and unconstrained optimization, single and multi-objective optimization, etc (Kiran, 2015; Haklı, 2019). In recent years, many swarm intelligence-based algorithms have been improved to solve optimization problems in a short time. These algorithms can be applied directly to constrained optimization problems. While constrained optimization is being carried out, these algorithms need to check for violations. The various algorithms have been used to overcome constraints in the literature and a lot of algorithms based on swarm intelligence have been chosen to solve constrained optimization problems. Babalik et al. (2018) also solved the constrained optimization problem using the Tree Seed Algorithm (TSA) (Babalik et al., 2018). Aslan (2019) also proposed the new variant of the Elephant Herding Optimization (GL-EHO) algorithm and tested its performance on constrained optimization (Aslan, 2019). Xu et al. (2018) proposed a new approach by combining the Differential Evolution (DE) algorithm with an adaptive trial vector and solved constrained optimization problems (Xu et al., 2018). Lin (2013) hybridized the genetic algorithm with the rough set theory to evaluate constraints well and solved the constrained optimization problem (Lin, 2013). Apart from these, many swarm-based algorithms have been applied in the literature for the constrained optimization problem (Bansal et al, 2018; Garg, 2016; Runarsson and Yao, 2000; Kohli and Arora, 2017).

The Tree Seed Algorithm (TSA) is a population-based algorithm and was first proposed by Kiran (Kiran, 2015). There are two types (Tree and Seed) of solution sets in TSA. It was created by simulating the relationship between trees and their seeds. There are many studies on TSA in the literature. Babalik et al. (2018) tested the success of TSA on constrained optimization by using Deb's rules (Babalik et al., 2018). El-Fergany and Hasanien (2018) used TSA to solve the problem of the optimum power flow in large-scale power systems involving validations and comparisons (Fergany and Hasanien, 2018). Jiang et al. (2020) developed the TSA through a feedback mechanism to optimize continuous problems (Jiang et al., 2020). Beşkirli et al. (2019) examined a comparison of the modified tree seed algorithm for high-dimensional numerical functions (Beşkirli et al., 2019). Apart from these, there are many studies on TSA in the literature (Aslan et al., 2018; Cinar et al., 2020).

The Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) was newly proposed by Abualigah et al. (Abualigah et al., 2021). Four arithmetic operations (Multiplication (M), Division (D), Subtraction (S), and Addition (A)) are used to improve the local and global search capability of the algorithm. The multiplication and division operations have been used to discover new points in the search space, and it has improved the exploration ability of the algorithm. Subtraction and Addition operations have been used to find local points in the search space, and it has improved the exploitation capability of the algorithm. Abualigah et al. tested the success of AOA on unimodal, multimodal, and hybrid composition benchmark functions. Due to the new recommendation of AOA in the literature, AOA has not been studied yet. AOA's success on different problems has not yet been tested. In this study, its success was tested on constrained optimization problems. The success of AOA has been increased by hybridizing with TSA. Hybrid AOA (HAOA) has been developed by adapting the seed production mechanism implemented in TSA to AOA. The seed production mechanism of TSA is placed in the random walking stage of AOA. New candidate solutions (seeds) have been produced with the arithmetic operators involved in AOA and the candidate solutions have been compared with the existing solutions. Thus, the performance of AOA has increased. The success of the newly proposed HAOA on different problems has also been shown in the literature. HAOA has also been applied to various engineering design problems. There are various engineering design problems in the literature (Braik, 2021). The best known of these are the Welded Beam Design problem (WBD), the Pressure Vessel Design problem (PVD), and Compression Spring Design (CSD). AOA and HAOA have been tested in three different engineering design problems. The success of HAOA and AOA has been demonstrated.

The organization of the paper: the AOA, TSA, HAOA, and constrained optimization problems have been examined in Section 2. HAOA and AOA are tested on thirteen constrained benchmark problems

for various population sizes in Section 3 and the results of HAOA were compared with AOA, ABC, DE, GA, PSO, EHO, EHO-NoB, HEHO, and GL-EHO on constrained optimization problems. In addition, AOA and HAOA have also been tested in three different engineering design problems. The results are discussed and evaluated.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. The Arithmetic Optimization Algorithm (AOA)

Abualigah et al. (2021) suggested a new meta-heuristic method called the Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) for the first time (Abualigah et al., 2021). The basic structure of AOA consists of four main arithmetic operators used in mathematics (Multiplication (M), Division (D), Subtraction (S), and Addition (A)). These arithmetic operators formed the search mechanism of AOA in the search space. Addition and subtraction operators shaped the local search structure in AOA, while multiplication and division operators shaped the global search structure in AOA. Figure 1 shows a hierarchy of arithmetic operators.

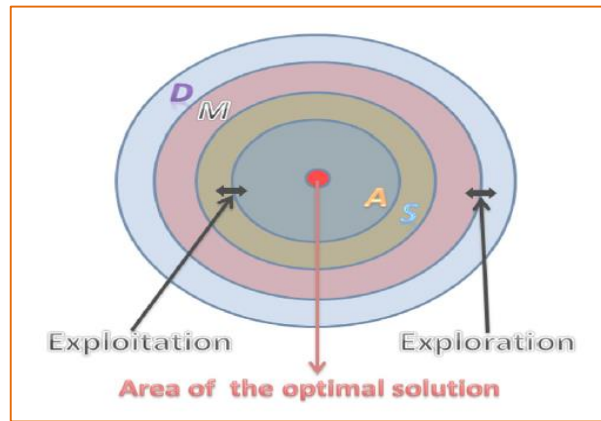


Figure 1. Hierarchy of arithmetic operators (Abualigah et al., 2021)

AOA chooses the exploration or exploitation phase at first. For this selection, the Math Optimizer Accelerated (MOA) function is calculated. Equation 1 shows the MOA function.

$$MOA(C_Iter) = Min + C_Iter \times \left(\frac{Max - Min}{Max_Iter} \right) \quad (1)$$

where $MOA(C_Iter)$ denotes the function value at the t th iteration, and C_Iter denotes the current iteration, and (Max_Iter) denotes the maximum number of iterations. Min and Max denote the minimum and maximum values of the accelerated function, respectively.

2.1.1. Exploration phase

The exploration operators of AOA explore the search area randomly on several regions with Division (D) search strategy and Multiplication (M) search strategy and find a better solution. Equation 2 shows the exploration phase. This phase of searching (exploration search by executing D or M) is conditioned by the Math Optimizer accelerated (MOA) function for the condition of $r_1 > MOA$ (r_1 is a random number). Which of Division (D) search strategy or the Multiplication (M) search strategy to be used is determined by the value of r_2 .

$$x_{i,j}(C_Iter + 1) = \begin{cases} best(x_j) \div (MOP + \epsilon) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_2 < 0.5 \\ best(x_j) \times MOP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

where r_2 is a random number. $best(x_j)$ is the j th position in the best-obtained solution so far. ϵ is a small integer number, UB_j denotes the upper bound value of the j th position and LB_j denotes the lower bound value of the j th position μ is a control parameter to adjust the search process. Math Optimizer Probability (MOP) is shown by Equation 3.

$$MOP(C_Iter) = 1 - \left(\frac{C_Iter^{1/\alpha}}{Max_Iter^{1/\alpha}} \right) \quad (3)$$

where $MOP(C_Iter)$ denotes the function value at the t th iteration, and C_Iter denotes the current iteration, and (Max_Iter) denotes the maximum number of iterations. α is a sensitive parameter and defines the exploitation accuracy over the iterations (Abualigah et al., 2021).

2.1.2. Exploitation phase

The exploitation operators of AOA are carried out with the Addition (A) search strategy and Subtraction (S) search strategy. In AOA, AOA's exploitation operators search the search area in detail in several local regions. Equation 4 shows the exploitation phase. Which of the Subtraction (S) search strategy or the Addition (A) search strategy to be used is determined by the value of r_3 .

$$x_{i,j}(C_Iter + 1) = \begin{cases} best(x_j) - MOP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_3 < 0.5 \\ best(x_j) + MOP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

where r_3 is a random number. $best(x_j)$ is the j th position in the best-obtained solution so far. ϵ is a small integer number, UB_j denotes the upper bound value of the j th position and LB_j denotes to lower bound value of the j th position μ is a control parameter to adjust the search process.

The Pseudo-code of the AOA has been explained in Algorithm 1. Figure 2 shows the flowchart of AOA.

Algorithm 1 Pseudo-code of the AOA

```

1: Assign parameter values ( $\alpha, \epsilon, \mu, \mu_{min}, \mu_{max}$ ) of AOA and initialize.
2: Initialize the solutions' positions (n) randomly. (Solutions: i=1, ..., N)
3: while (C_Iter < Max_Iter) do
4:   Calculate the objective function for the given solutions
5:   Find the best (best) solution
6:   Update the MOA and the MOP values with Eq. (1) and Eq. (3)
7:   for (i=1 to N) do
8:     for (j=1 to n) do
9:       Generate a random values between [0, 1] ( $r_1, r_2$ , and  $r_3$ )
10:      if  $r_1 > MOA$  then
11:        if  $r_2 > 0.5$  then
12:          Update the  $i$ th solution positions using Eq. (2) ( Division (D) search strategy)
13:        else
14:          Update the  $i$ th solution positions using Eq. (2) (Multiplication (M) search strategy)
15:        end if
16:      else
17:        if  $r_3 > 0.5$  then
18:          Update the  $i$ th solution positions using Eq. (4) (Subtraction (S) search strategy)
19:        else
20:          Update the  $i$ th solution positions using Eq. (4) (Addition (A) search strategy)
21:        end if
22:      end if
23:    end for
24:  end for
25:  C_Iter=C_Iter+1
26: end while
27: The best solution

```

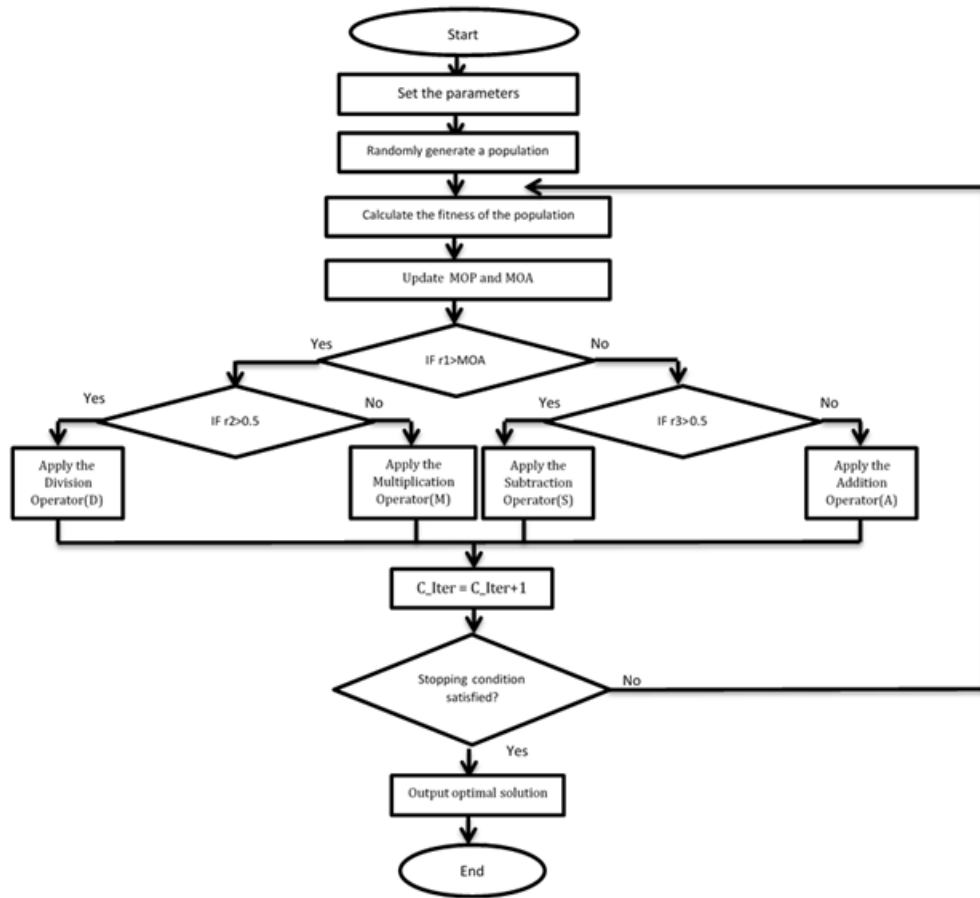


Figure 2. The flowchart of AOA

2.2. The Tree Seed Algorithm (TSA)

The Tree Seed Algorithm (TSA) is a population-based algorithm and was first proposed by Kiran (Kiran, 2015). There are two types (Tree and Seed) of solution sets in TSA. It was created by simulating the relationship between trees and their seeds. In nature, trees spread their seeds and these seeds grow over time, eventually forming new trees. Considering the surface with these trees as the search space, the positions of the trees and seeds represent solutions for the optimization problem. Initial tree population formation in TSA is shown by Equation 5 (Babalik et al., 2018).

$$Tree_{i,j} = LB_j + r_{i,j}(UB_j - LB_j) \quad i = 1, 2, \dots, N \text{ and } j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

where $Tree_{i,j}$ shows j th dimension of i th tree, UB_j and LB_j are the upper and lower bound for the search space, N is the number of tree in the stand, n is the dimensionality of the optimization problem, and $r_{i,j}$ is a random number produced in a range of $[0,1]$.

There are two different solution update equations in seed production. One of them uses the best seed location to improve the algorithm's exploitation capability, and the other uses a solution randomly selected from the population to explore different regions in the solution space. The equation to be used for seed production is decided by a control parameter called search tendency-ST (Babalik et al., 2018). Equation 6 shows the seed production mechanism.

$$Seed_{k,j} = \begin{cases} Tree_{i,j} + \alpha_{i,j} \times (best_j - Tree_{r,j}), & r < ST \\ Tree_{i,j} + \alpha_{i,j} \times (Tree_{i,j} - Tree_{r,j}), & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

where ST is a pre-defined value in a range of $[0,1]$, r is randomly produced in a range of $[0,1]$, $Tree_{i,j}$ is a neighbor tree location randomly selected from the population. $\alpha_{i,j}$ is a scaling factor randomly produced in the range of $[-1,1]$. $best_j$ is the j th position in the best-obtained solution so far. $Seed_{k,j}$ is the j th dimension of k th seed produced from i th tree.

The number of seeds for each tree is important for TSA's local exploration capability. Kiran (2015) analyzed the number of seeds for each tree in his study and suggested a number in a range of 10% and 25% of the number of trees in the stand.

The Pseudo-code of the TSA has been explained in Algorithm 2.

Algorithm 2 Pseudo-code of the TSA

```

1:   Assign parameter values ( $ST, \alpha, r$ ) of TSA and initialize.
2:   Initialize the trees' positions ( $n$ ) randomly with Eq. (5). (Trees:  $i=1, \dots, N$ )
3:   Calculate the objective function for the given trees
4:   Find the best (best) tree
5:   while ( $C\_Iter < Max\_Iter$ ) do
6:     for ( $i=1$  to  $N$ ) do
7:       Produce the seeds with Eq. (6).
8:       Calculate the objective function for the given seeds
9:       Find the best (best) seed
10:      Compare the best seed with the current tree
11:      If the best seed is better than the current tree, remove the current tree from the population and locate the best seed in
the population.
12:     end for
13:   Find the best (best) tree
14:    $C\_Iter = C\_Iter + 1$ 
15: end while
16: The best tree

```

2.3. Hybrid The Arithmetic Optimization Algorithm (HAOA)

Abualigah et al. (2021) suggested the Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) for the first time (Abualigah et al., 2021). It performs local and global searches in the AOA search space by using four main arithmetic operators. These arithmetic operators are addition, subtraction, multiplication, and division. AOA prefers addition and subtraction strategies over exploring local points, whereas AOA prefers multiplication and division strategies over exploring global points. Kiran (2015) suggested the Tree Seed Algorithm (TSA) for the first time (Kiran, 2015). There are two types (Tree and Seed) of solution sets in TSA. It was created by simulating the relationship between trees and their seeds. In this study, TSA and AOA algorithms are hybridized. The seed production mechanism of TSA is placed in the random walking stage of AOA. New candidate solutions (seeds) have been produced with the arithmetic operators involved in AOA and the candidate solutions have been compared with the existing solutions. Thus, the performance of AOA has increased. Thus, the hybrid AOA-TSA (HAOA) has been proposed. In HAOA, the number of new candidate solutions (seeds) to be produced for each solution was found by Equations 7-9.

$$low = round(N * 0.1) \quad (7)$$

$$high = round(N * 0.25) \quad (8)$$

$$ns_i = round(low + (high - low) * r) + 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

where r is randomly produced in the range of $[0,1]$, ns is the number of the candidate solutions (seeds) for each solution, and i is population size.

The Pseudo-code of the HAOA has been explained in Algorithm 3.

Algorithm 3 Pseudo-code of the HAOA

```

1:  Assign parameter values ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) of HAOA and initialize.
2:  Initialize the solutions positions (n) randomly. (Solutions:  $i=1, \dots, N$ )
3:  while (C_Iter < Max_Iter) do
4:    Calculate the objective function for the given solutions
5:    Find the best (best) solution
6:    Update the MOA and the MOP values with Eq. (1) and Eq. (3)
7:    for ( $i=1$  to  $N$ ) do
8:      Calculate the number of candidate solutions (seeds) for each solution (ns) with Eqs. (7-9)
9:      for ( $k=1$  to ns) do
10:       for ( $j=1$  to n) do
11:        Generate a random values between [0, 1] ( $r_1$ ,  $r_2$ , and  $r_3$ )
12:        if  $r_1 > \text{MOA}$  then
13:          if  $r_2 > 0.5$  then
14:            Produce the candidate solutions (seeds) using Eq. (2) (Division (D) search strategy)
15:          else
16:            Produce the candidate solutions (seeds) using Eq. (2) (Multiplication (M) search strategy)
17:          end if
18:        else
19:          if  $r_3 > 0.5$  then
20:            Produce the candidate solutions (seeds) using Eq. (4) (Subtraction (S) search strategy)
21:          else
22:            Produce the candidate solutions (seeds) using Eq. (4) (Addition (A) search strategy)
23:          end if
24:        end if
25:      end for
26:    end for
27:    Compare the best candidate solution (seed) with the current solution
28:    If the best candidate solution (seed) is better than the current solution, remove the current solution from
29:    the population and locate the best candidate solution (seed) in the population.
30:  end for
31:  C_Iter=C_Iter+1
32: end while
33: The best solution

```

2.4. Constrained Optimization

Optimization problems search for the search space according to some constraints (Haklı, 2019). These constraints are shown in Equation 10.

$$\begin{aligned}
 & \text{optimize } f(x) \\
 & \text{subject to} \\
 & g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, q \\
 & h_i(x) = 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, p
 \end{aligned} \tag{10}$$

where $f(x)$ is the fitness function of the problem, $g(x)$ represents inequality constraint and $h(x)$ is an equality constraint. q and p are respectively numbers of inequality constraints and equality constraints (Haklı, 2019). Equality constraints narrow the available search space. Therefore, it becomes difficult to find the most suitable solutions for optimization techniques (Haklı, 2019). In order to overcome this problem, equality constraints can be converted into inequality constraints (Strumberger et al., 2018):

$$|h_j(x)| \leq \varepsilon \quad j = 1, 2, 3, \dots, p \tag{11}$$

where ε represents small violation tolerance. In constrained optimization, since the verification of the solution found depends on the violation of the constraints, the violation of the constraints is as important as the fitness value obtained from the objective function (Babalik et al., 2018).

3. EXPERIMENTAL ANALYSIS

The performances of AOA and Hybrid AOA (HAOA) have been tested on thirteen constrained problems (Haklı, 2019; Babalik et al., 2018; Runarsson and Yao, 2000). Descriptions of these problems are given in the appendix section of Babalik et al.'s study (Babalik et al., 2018). There are four maximization and nine minimization problems. G02, G03, G08, and G12 are maximization, and the G01, G04, G05, G06, G07, G09, G10, G11, and G13 are minimization problems. The dimension of each function is 13, 20, 10, 5, 4, 2, 10, 2, 7, 8, 2, 3, and 5, respectively. In this study, six different values were chosen for the size of the population {10, 20, 40, 60, 80, and 100} and the maximum number of function evaluations was determined as $2.4E+5$ as in other studies (Babalik et al., 2018; Haklı, 2019; Ivana Strumberger et al., 2018). 30 independent runs were carried out for each function. The experiments are executed with a 2.3 GHz CPU and 4 GB RAM. The parameters setup of AOA and HAOA are shown in Table 1.

Table 1. Parameters setup for AOA and HAOA

Methods	Population size (N)	Maximum evaluation	μ	α	Min	Max	$r1, r2, \text{ and } r3$
AOA	10, 20, 40, 60, 80, 100	$2.4E+5$	0.5	5	0.2	1	[0,1]
HAOA	10, 20, 40, 60, 80, 100	$2.4E+5$	0.5	5	0.2	1	[0,1]

3.1. Comparing AOA and HAOA algorithms for population size=10, 20, 40, 60, 80, and 100

In this subsection, the performance of AOA and HAOA in various population values has been evaluated for thirteen benchmark problems. The best, worst, mean, and standard deviation (SD) values were found for the obtained results. Table 2 shows AOA and HAOA comparison results for population size=10, 20, and 40. Table 3 shows AOA and HAOA comparison results for population size=60, 80, and 100. Table 4 shows HAOA comparison results for all the population sizes. Better results are marked in bold font. According to the results, the HAOA results exceeded the AOA results in all benchmark problems and achieved 100% success. According to Table 4, HAOA showed its best mean performance when the population size was selected as 60, 80, and 100 and HAOA showed its best SD performance when the population size was selected as 60 and 100.

A statistical test was performed on the results to show if there was a significant difference between AOA and HAOA results. Statistical test results are shown in Table 5. According to the results, if the h value is 1, there is a semantic difference in the results, and 0 indicates that there is no semantic difference in the results. The confidence interval of the Wilcoxon Signed-Rank test results of the AOA and HAOA algorithms is 0.05 in Table 5. The results showed that HAOA significantly improved the performance of AOA.

Figure 3 shows the convergence charts of AOA and HAOA for thirteen benchmark problems for population size=40. HAOA gave results that were more stable than AOA and did not show abrupt changes. HAOA converged to optimal results more quickly than AOA.

Table 2. Comparing AOA and HAOA algorithms for population size=10, 20, and 40

Problem	Optimal	Min./Max.	AOA			HAOA			
			N=10	N=20	N=40	N=10	N=20	N=40	
G1	-15.000	Min.	Best	-8.9949	-10.2458	-11.7438	-15.0000	-15.0000	-15.0000
			Worst	-6.0000	-6.0000	-6.0000	-15.0000	-15.0000	-15.0000
			Mean	-7.5180	-8.2023807	-8.2022	-15.0000	-15.0000	-15.0000
			SD	1.1966	1.2291	1.4980	4.25E-13	1.04E-11	2.95E-11
G2	0.803619	Max.	Best	0.391954	0.409160	0.389537	0.803777	0.803774	0.803774
			Worst	0.238129	0.245952	0.255891	0.751332	0.786154	0.803765
			Mean	0.316291	0.314459	0.305839	0.787934	0.799721	0.803771
			SD	0.036056	0.041938	0.032353	0.015251	0.005497	2.14E-06
G3	1.000	Max.	Best	0.7487	0.5397	0.7807	1.0000	1.0000	1.0000
			Worst	0.2157	0.2821	0.3424	1.0000	1.0000	1.0000
			Mean	0.4277	0.4191	0.4464	1.0000	1.0000	1.0000
			SD	0.1107	0.0751	0.0920	0.0000	0.0000	0.0000
G4	-30665.539	Min.	Best	-30655.859	-30628.401	-30569.897	-30665.539	-30665.539	-30665.539
			Worst	-29353.432	-29413.147	-29440.351	-30665.539	-30665.539	-30665.539
			Mean	-29702.704	-29864.681	-29769.803	-30665.539	-30665.539	-30665.539
			SD	295.935	376.664	304.024	3.50E-10	5.34E-11	1.92E-11
G5	5126.498	Min.	Best	5285.8941	5309.2067	5274.1580	5126.6811	5126.6071	5126.6281
			Worst	197072.6800	189380.3300	105649.540	5882.3934	5645.3743	5702.9671
			Mean	21161.6440	19757.8150	13678.9120	5230.8464	5210.8120	5186.9092
			SD	41158.5850	33847.7050	20748.0590	171.9845	126.0258	114.3980
G6	-6961.814	Min.	Best	-6811.4451	-6820.1903	-6717.4193	-6961.8155	-6961.8155	-6961.8155
			Worst	-5408.1825	-5371.1019	-4957.7713	-6961.8155	-6961.8155	-6961.8155
			Mean	-6034.3193	-6179.9272	-6153.6696	-6961.8155	-6961.8155	-6961.8155
			SD	382.1495	465.3159	448.1510	0.0000	0.0000	0.0000
G7	24.306	Min.	Best	100.7648	76.5262	233.0540	24.3470	24.3346	24.3392
			Worst	1969.0024	2455.7213	2898.0409	24.8349	24.5090	24.4809
			Mean	730.4350	837.0931	869.8616	24.5157	24.4131	24.4034
			SD	452.1383	585.5025	492.0641	0.1217	0.0497	0.0346
G8	0.095825	Max.	Best	0.095491	0.095685	0.095803	0.095825	0.095825	0.095825
			Worst	0.025357	0.025643	0.025797	0.029144	0.095825	0.095825
			Mean	0.085591	0.081791	0.085653	0.093602	0.095825	0.095825
			SD	0.019851	0.024683	0.020099	0.011970	2.78E-17	2.78E-17
G9	680.63	Min.	Best	722.7471	711.1926	692.4062	680.6309	680.6313	680.6309
			Worst	822.9434	823.2670	819.1971	680.6368	680.6348	680.6337
			Mean	783.3395	766.2433	742.4198	680.6334	680.6329	680.6321
			SD	29.70371	29.6735	32.2719	0.0016	0.0009	0.0007
G10	7049.25	Min.	Best	15121.503	15872.75	16315.177	7063.1916	7061.0968	7059.6901
			Worst	30000.342	30000.055	30000.181	7586.410	7367.1494	7192.8125
			Mean	28958.647	28878.606	28163.504	7208.5445	7129.5320	7104.7907
			SD	2991.3356	3303.9387	3769.9498	139.8415	62.2624	36.7048
G11	0.75	Min.	Best	0.9997	0.9997	0.7627	0.7501	0.7499	0.7499
			Worst	0.9998	1.0002	1.0002	0.8950	0.9184	0.8778
			Mean	0.9997	0.9998	0.9842	0.7886	0.7777	0.7727
			SD	4.504E-05	9.604E-05	0.0505	0.0369	0.0389	0.0320
G12	1.000	Max.	Best	0.999998	0.999961	0.999992	1.000	1.000	1.000
			Worst	0.999735	0.999788	0.999713	1.000	1.000	1.000
			Mean	0.999916	0.999883	0.999907	1.000	1.000	1.000
			SD	6.505E-05	5.550E-05	6.796E-05	0.000	0.000	0.000
G13	0.05395	Min.	Best	0.65464	0.68307	0.06604	0.44009	0.46701	0.67033
			Worst	1.99980	7.12876	10.2887	3.48280	0.99999	1.15430
			Mean	1.22174	1.38483	1.34903	0.98898	0.94725	0.98781
			SD	0.40862	1.16457	1.77770	0.48450	0.12943	0.06650

Table 3. Comparing AOA and HAOA algorithms for population size=60, 80, and 100

Problem	Optimal	Min./Max.	AOA			HAOA			
			N=60	N=80	N=100	N=60	N=80	N=100	
G1	-15.000	Min.	Best	-11.8171	-10.030321	-9.6961	-15.0000	-15.0000	-15.0000
			Worst	-6.0000	-6.0000	-6.0000	-15.0000	-15.0000	-15.0000
			Mean	-8.6623	-8.047555	-8.2317	-15.0000	-15.0000	-15.0000
			SD	1.1636	1.3695	1.2285	2.02E-11	7.55E-12	8.28E-12
G2	0.803619	Max.	Best	0.374180	0.460022	0.396971	0.803773	0.803774	0.803774
			Worst	0.246054	0.271129	0.263217	0.803768	0.803768	0.803768
			Mean	0.298437	0.323082	0.321634	0.803771	0.803772	0.803771
			SD	0.033894	0.048367	0.033699	1.27E-06	1.38E-06	1.48E-06
G3	1.000	Max.	Best	0.7746	0.6718	0.8850	1.0000	1.0000	1.0000
			Worst	0.2511	0.2083	0.2984	1.0000	1.0000	1.0000
			Mean	0.4373	0.4142	0.4310	1.0000	1.0000	1.0000
			SD	0.1134	0.0941	0.1125	0.0000	0.0000	0.0000
G4	-30665.539	Min.	Best	-30568.967	-30574.709	-30576.023	-30665.540	-30665.540	-30665.540
			Worst	-29415.253	-29466.224	-29440.550	-30665.540	-30665.540	-30665.540
			Mean	-29846.710	-29835.787	-29832.960	-30665.540	-30665.540	-30665.540
			SD	367.986	309.725	296.731	2.58E-11	1.92E-11	7.28E-12
G5	5126.498	Min.	Best	5271.0473	5376.0605	5300.0793	5126.5932	5126.5955	5126.5322
			Worst	53831.806	41811.412	131241.64	5415.7013	5549.4217	6050.0505
			Mean	10208.656	8932.1443	10948.742	5166.3762	5185.0307	5245.1527
			SD	10055.296	8325.3616	22446.066	57.6578	92.9843	185.3663
G6	-6961.814	Min.	Best	-6784.7484	-6933.5702	-6115.7646	-6961.8155	-6961.8155	-6961.8155
			Worst	-5113.3448	-4821.1231	-2353.9016	-6961.8155	-6961.8155	-6961.8155
			Mean	-6200.1311	-6143.5361	-5711.0374	-6961.8155	-6961.8155	-6961.8155
			SD	344.3004	440.9267	628.6112	0.0000	0.0000	0.0000
G7	24.306	Min.	Best	425.6965	436.5212	483.2933	24.3426	24.3395	24.3401
			Worst	1323.9415	2478.5446	2300.7003	24.4497	24.4470	24.4460
			Mean	904.5381	1003.9447	1015.6819	24.3963	24.3868	24.3953
			SD	286.0819	393.7003	408.9039	0.02607	0.02818	0.02716
G8	0.095825	Max.	Best	0.095701	0.095315	0.095768	0.095825	0.095825	0.095825
			Worst	0.025969	0.025748	0.025662	0.095825	0.095825	0.095825
			Mean	0.090408	0.085514	0.087666	0.095825	0.095825	0.095825
			SD	0.012172	0.019443	0.016457	2.78E-17	2.78E-17	2.78E-17
G9	680.63	Min.	Best	699.8415	686.9464	689.1064	680.6306	680.6306	680.6309
			Worst	813.3713	793.0415	832.6263	680.6330	680.6329	680.6329
			Mean	732.7981	730.0166	738.3557	680.6318	680.6319	680.6317
			SD	26.7901	24.1272	33.7390	0.0006	0.0005	0.0005
G10	7049.25	Min.	Best	11602.2480	17915.4610	23531.7840	7060.0143	7053.7270	7049.8481
			Worst	30000.0770	30000.0580	30000.1500	7187.5255	7156.2179	7179.2562
			Mean	28149.1710	28759.9030	29232.6030	7099.2976	7100.7723	7093.6483
			SD	4484.2020	3021.6864	1637.2815	27.3408	28.0190	27.5670
G11	0.75	Min.	Best	0.9997	0.7553	0.8603	0.7499	0.7499	0.7499
			Worst	1.0002	1.0002	1.0002	0.7922	0.7938	0.7755
			Mean	0.9998	0.9891	0.9826	0.7554	0.7552	0.7528
			SD	0.0002	0.0457	0.0442	0.0084	0.0095	0.0054
G12	1.000	Max.	Best	0.999992	0.999995	0.999996	1.000	1.000	1.000
			Worst	0.999785	0.99971	0.999817	1.000	1.000	1.000
			Mean	0.999899	0.99990	0.999916	1.000	1.000	1.000
			SD	5.48E-05	7.67E-05	4.98E-05	0.000	0.000	0.000
G13	0.05395	Min.	Best	0.478609	0.146282	0.169063	0.865197	0.481268	0.935540
			Worst	7.884131	7.214411	9.650241	1.391072	1.495773	0.999997
			Mean	1.365598	1.463003	1.471600	1.003210	0.982606	0.995394
			SD	1.288158	1.500493	1.642668	0.076274	0.150232	0.012438

Table 4. Comparing the variations of HAOA algorithm for population size=10, 20, 40, 60, 80, and 100

ID	N=10		N=20		N=40		N=60		N=80		N=100	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
G1	-15.0000	4.25E-13	-15.0000	1.04E-11	-15.0000	2.95E-11	-15.0000	2.02E-11	-15.0000	7.55E-12	-15.0000	8.28E-12
G2	0.787934	0.015251	0.799721	0.005497	0.803771	2.14E-06	0.803771	1.27E-06	0.803772	1.38E-06	0.803771	1.48E-06
G3	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
G4	-30665.53	3.50E-10	-30665.53	5.34E-11	-30665.53	1.92E-11	-30665.53	2.58E-11	-30665.53	1.92E-11	-30665.53	7.28E-12
G5	5230.846	171.984	5210.812	126.025	5186.909	114.398	5166.376	57.657	5185.030	92.984	5245.152	185.366
G6	-6961.815	0.0000	-6961.815	0.0000	-6961.815	0.0000	-6961.815	0.0000	-6961.815	0.0000	-6961.815	0.0000
G7	24.5157	0.1217	24.4131	0.0497	24.4034	0.0346	24.3963	0.0260	24.3868	0.0281	24.3953	0.02716
G8	0.093602	0.011970	0.095825	2.78E-17	0.095825	2.78E-17	0.095825	2.78E-17	0.095825	2.78E-17	0.095825	2.78E-17
G9	680.6334	0.0016	680.6329	0.0009	680.6321	0.0007	680.6318	0.0006	680.6319	0.0005	680.6317	0.0005
G10	7208.544	139.841	7129.532	62.2624	7104.790	36.7048	7099.297	27.340	7100.772	28.019	7093.648	27.5670
G11	0.7886	0.0369	0.7777	0.0389	0.7727	0.0320	0.7554	0.0084	0.7552	0.0095	0.7528	0.0054
G12	1.000	0.0000	1.000	0.0000	1.000	0.0000	1.000	0.0000	1.000	0.0000	1.000	0.0000
G13	0.98898	0.48450	0.94725	0.12943	0.98781	0.06650	1.00321	0.0762	0.98261	0.1502	0.99539	0.01244

Table 5. The results of Wilcoxon Signed-Rank Test on the results of HAOA and AOA algorithms for population size=10, 20, 40, 60, 80, and 100

ID	HAOA-AOA											
	N=10		N=20		N=40		N=60		N=80		N=100	
	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h
G1	1.61e-06	1	1.73E-06	1	1.67E-06	1	1.73E-06	1	1.64E-06	1	1.71E-06	1
G2	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G3	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G4	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G5	2.88E-06	1	1.92E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G6	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G7	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G8	2.37E-05	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G9	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G10	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G11	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.92E-06	1	1.73E-06	1
G12	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G13	0.0003589	1	9.71E-05	1	0.3285711	0	0.0027653	1	0.0544625	0	0.0024147	1

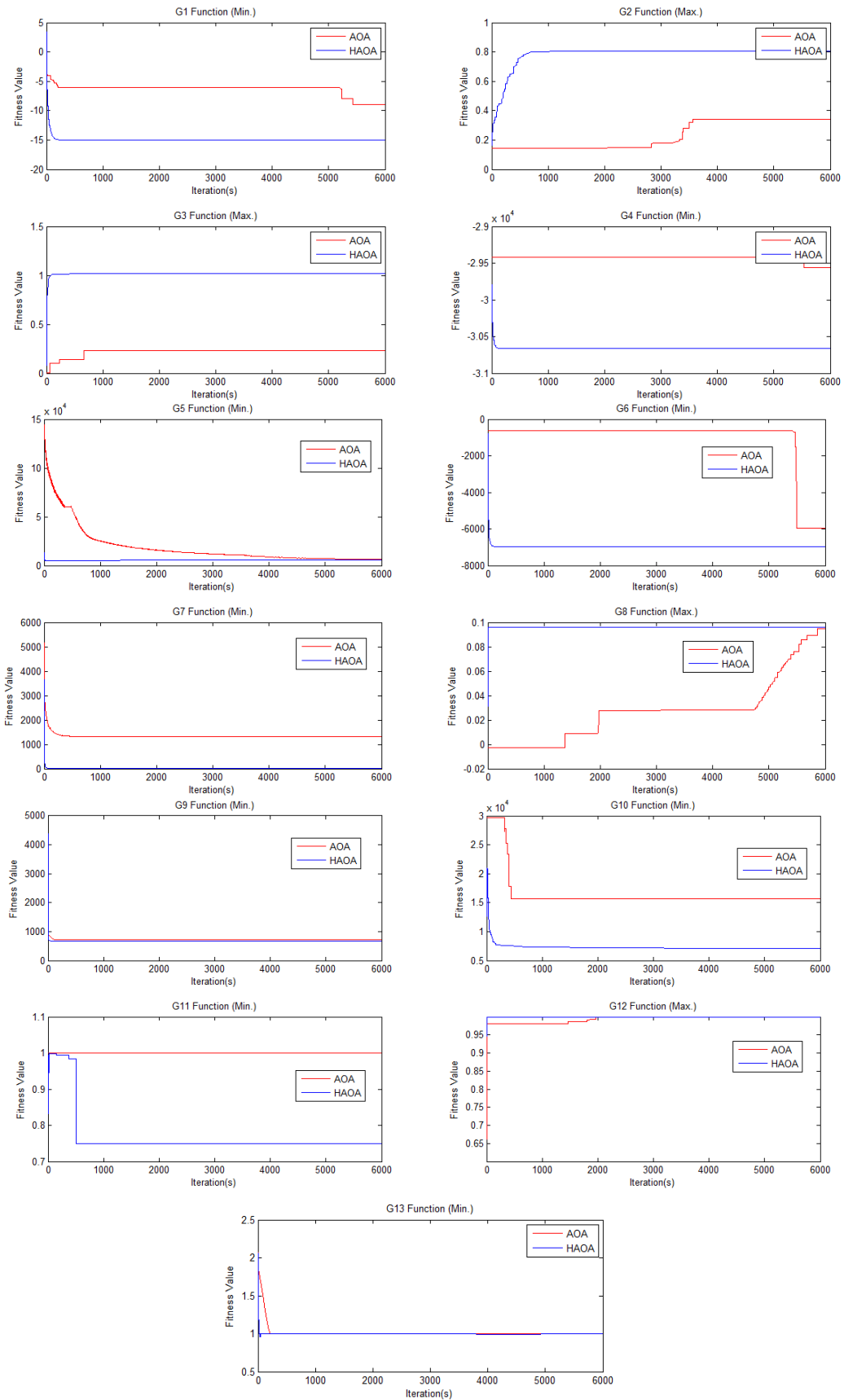


Figure 3. The convergence charts of AOA and HAOA for thirteen benchmark problems

3.2. A comparison of HAOA with other algorithms

In the experiments, it has been proven that the success of HAOA exceeds the success of AOA. In this subsection, the success of HAOA has been compared with different methods in the literature. The HAOA is compared with Artificial Bee Colony (ABC), Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), Differential Evolution (DE), Elephant Herding Optimization (EHO), Elephant Herding Optimization with Global and Local search (GL-EHO), Hybridized EHO (HEHO), EHO-NoB, and Tree Seed Algorithm (CTSA). The experimental results are shown in Tables 7 - 9 (Babalik et al., 2018; Haklı, 2019). 30 independent runs were carried out for each function for all the algorithms except GA. The selected parameters for the comparison algorithms are shown in Table 6.

Table 6. Parameters setup for HAOA and other algorithms

Methods	Population size (N)	Maximum evaluation	Other parameters
HAOA	40	2.4E+5	$\mu = 0.5; \alpha = 5; \text{Min} = 0.2; \text{Max} = 1; r1, r2, \text{ and } r3 = [0, 1]$
EHO	50	2.4E+5	the number of elephant in each clan is set 10; $\alpha = 0.5; \beta = 0.1; c1 \text{ and } c2 = 1.5$
GL-EHO	50	2.4E+5	the number of elephant in each clan is set 10; $\alpha = 0.5; \beta = 0.1; c1 \text{ and } c2 = 1.5$
HEHO	50	2.4E+5	the number of elephant in each clan is set 10; $\alpha = 0.5; \beta = 0.1; c1 \text{ and } c2 = 1.5$
EHO-NoB	50	2.4E+5	the number of elephant in each clan is set 10; $\alpha = 0.5; \beta = 0.1; c1 \text{ and } c2 = 1.5$
ABC	40	2.4E+5	-
PSO	40	2.4E+5	-
GA	40	2.4E+5	-
DE	40	2.4E+5	-
CTSA	40	2.4E+5	$ST = 0.1$

According to Table 7, HAOA performed better than other algorithms (ABC, DE, GA, and PSO) in 8 out of 13 benchmark problems (G1, G2, G3, G4, G6, G8, G10, and G12). According to Table 8, HAOA performed better than other algorithms (GL-EHO, EHO, HEHO, and EHO-NoB) in 8 out of 13 benchmark problems (G1, G2, G3, G4, G8, G9, G10, and G12). After HAOA, HEHO has been the most successful algorithm (in 7 out of 13 benchmark problems). According to Table 9, HAOA performed better than other algorithms (AOA and CTSA) in 12 out of 13 benchmark problems (G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G10, G11, and G12). CTSA performed well in 7 out of 13 benchmark problems (G1, G3, G4, G6, G8, G12, and G13).

A statistical test was performed on the results to show if there was a significant difference between HAOA, ABC, PSO, GA, DE, EHO, GL-EHO, HEHO, EHO-NoB, and CTSA results. Statistical test results are shown in Table 10 and Table 11. According to the results, if the h value is 1, there is a semantic difference in the results, and 0 indicates that there is no semantic difference in the results. The confidence interval of the Wilcoxon Signed-Rank test results of the HAOA and other algorithms is 0.05 in Table 10 and Table 11. The results showed that there is a significant difference between HAOA and the results of other comparison algorithms.

Figure 4 shows the convergence charts of AOA, HAOA, EHO, GL-EHO, HEHO, and EHO-NoB for five benchmark problems. Figure 5 shows the convergence charts of AOA, HAOA, ABC, PSO, DE, and CTSA for five benchmark problems. The convergence results have proven the success of HAOA.

Table 7. Comparing HAOA and other algorithms (ABC, PSO, GA, and DE)

Problem	Optimal		ABC	PSO	GA	DE	HAOA
G1	-15.000	Mean	-15.000	-10.5551	-14.236	-14.2406	-15.0000
		Difference	0.0205	4.4449	0.7640	0.7594	0.0000
G2	0.803619	Mean	0.4795	0.4043	0.7886	0.6660	0.803771
		Difference	0.3241	0.3993	0.0150	0.1376	0.00015
G3	1.000	Mean	3.0191	1.1675	0.9760	1.1694	1.0000
		Difference	2.0191	0.1675	-0.0240	0.1694	0.0000
G4	-30665.539	Mean	-30610.974	-30661.740	-30590.455	-30665.540	-30665.539
		Difference	54.565	3.799	75.084	0.001	0.0000
G5	5126.498	Mean	5115.056	5298.284	N/A	5329.197	5186.9092
		Difference	11.441	171.787	N/A	202.700	60.4112
G6	-6961.814	Mean	-7579.630	-6961.819	-6872.204	-6765.482	-6961.8155
		Difference	617.816	0.005	89.610	196.332	0.0015
G7	24.306	Mean	29.0956	28.7418	34.9800	24.3160	24.4034
		Difference	4.7896	4.4358	10.6740	0.0100	0.0974
G8	0.095825	Mean	6.5347	0.0847	0.0958	0.0958	0.095825
		Difference	6.4389	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000
G9	680.63	Mean	683.8941	680.7815	692.0640	680.6308	680.6321
		Difference	3.2641	0.1515	11.4340	0.0008	0.0021
G10	7049.25	Mean	7259.028	8128.793	10003.225	7162.592	7104.7907
		Difference	209.778	1079.543	2953.975	113.342	55.5407
G11	0.75	Mean	0.7171	0.7626	0.7500	0.9545	0.7727
		Difference	0.0329	0.0126	0.0000	0.2045	0.0227
G12	1.000	Mean	1.0001	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		Difference	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G13	0.05395	Mean	0.0955	1.4228	N/A	0.9492	0.98781
		Difference	0.04155	1.3273	N/A	0.8537	0.93386

Table 8. Comparing HAOA and other algorithms (EHO, EHO-NoB, HEHO, and GL-EHO)

Problem	Optimal		EHO	EHO-NoB	HEHO	GL-EHO	HAOA
G1	-15.000	Mean	-1.088	-14.500	-14.958	-15.0000	-15.0000
		Difference	-	-	-14.958	0.0000	0.0000
G2	0.803619	Mean	0.2522	0.4490	0.799125	0.6405	0.803771
		Difference	-	-	0.026	0.1631	0.00015
G3	1.000	Mean	0.6560	0.4864	1.000	0.9026	1.0000
		Difference	-	-	0.000	-0.0974	0.0000
G4	-30665.539	Mean	30333.809	-30304.074	-30499.033	-30665.540	-30665.539
		Difference	-	-	16.302	0.001	0.0000
G5	5126.498	Mean	5373.189	5182.527	5126.505	5502.522	5186.9092
		Difference	-	-	0.041	376.025	60.4112
G6	-6961.814	Mean	-6943.713	-6227.937	-6957.361	-6961.814	-6961.8155
		Difference	-	-	1.005	0.002	0.0015
G7	24.306	Mean	446.6258	83.0228	24.309	36.9279	24.4034
		Difference	-	-	0.003	12.6219	0.0974
G8	0.095825	Mean	0.095376	0.095825	0.095825	0.0958	0.095825
		Difference	-	-	0.000	0.0000	0.0000
G9	680.63	Mean	927.874	709.6519	680.653	681.7680	680.6321
		Difference	-	-	0.011	1.1380	0.0021
G10	7049.25	Mean	10236.025	8162.372	7152.895	8374.642	7104.7907
		Difference	-	-	95.239	1325.392	55.5407
G11	0.75	Mean	0.7400	0.7399	0.751	0.7399	0.7727
		Difference	-	-	0.001	0.0101	0.0227
G12	1.000	Mean	1.000	1.000	1.000	1.0000	1.0000
		Difference	-	-	0.000	0.0000	0.0000
G13	0.05395	Mean	1.3335	1.0946	0.246	0.4043	0.98781
		Difference	-	-	0.106	0.3088	0.93386

Table 9. Comparing HAOA and other algorithms (AOA and CTSA)

Problem	Optimal		CTSA	AOA	HAOA
G1	-15.000	Mean	-15.0000	-8.2022	-15.0000
		SD	0.0000	1.4980	2.95E-11
G2	0.803619	Mean	0.801098	0.305839	0.803771
		SD	0.003500	0.032353	2.14E-06
G3	1.000	Mean	1.0000	0.4464	1.0000
		SD	0.0000	0.0920	0.0000
G4	-30665.539	Mean	-30665.539	-29769.803	-30665.539
		SD	0.0000	304.024	1.92E-11
G5	5126.498	Mean	5195.827	13678.9120	5186.9092
		SD	121.868	20748.0590	114.3980
G6	-6961.814	Mean	-6961.816	-6153.6696	-6961.816
		SD	0.0000	448.1510	0.0000
G7	24.306	Mean	24.488	869.8616	24.4034
		SD	0.083	492.0641	0.0346
G8	0.095825	Mean	0.095825	0.085653	0.095825
		SD	0.0000	0.020099	2.78E-17
G9	680.63	Mean	680.642	742.4198	680.6321
		SD	0.004	32.2719	0.0007
G10	7049.25	Mean	7131.794	28163.504	7104.7907
		SD	71.905	3769.9498	36.7048
G11	0.75	Mean	0.806	0.9842	0.7727
		SD	0.055	0.0505	0.0320
G12	1.000	Mean	1.0000	0.999907	1.0000
		SD	0.0000	6.796E-05	0.0000
G13	0.05395	Mean	0.9876	1.34903	0.98781
		SD	0.2816	1.77770	0.06650

Table 10. The results of the Wilcoxon Signed-Rank Test on the results of HAOA, ABC, PSO, GA, DE, and CTSA algorithms

ID	HAOA									
	ABC		PSO		GA		DE		CTSA	
	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h
G1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G2	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.92E-06	1	1.73E-06	1	3.82E-01	<u>0</u>
G3	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G4	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G5	1.73E-06	1	1.73E-06	1	N/A	-	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G6	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G7	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G8	6.80E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G9	1.72E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G10	1.72E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G11	1.73E-06	1	0.24519	<u>0</u>	1.92E-06	1	1.73E-06	1	1.20E-03	1
G12	4.32E-08	1	1	<u>0</u>	1	<u>0</u>	1	<u>0</u>	1	<u>0</u>
G13	1.73E-06	1	1.73E-06	1	N/A	-	1.57E-02	1	3.39E-01	<u>0</u>

Table 11. The results of the Wilcoxon Signed-Rank Test on the results of HAOA, EHO, GL-EHO, HEHO, and EHO-NoB algorithms

ID	HAOA							
	EHO		GL-EHO		HEHO		EHO-NoB	
	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h	P-Value	h
G1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G2	1.73E-06	1	1.73E-06	1	4.66E-01	<u>0</u>	1.73E-06	1
G3	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G4	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G5	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G6	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G7	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G8	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1	4.32E-08	1
G9	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G10	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
G11	1.73E-06	1	1.73E-06	1	9.32E-06	1	1.73E-06	1
G12	1	<u>0</u>	1	<u>0</u>	1	<u>0</u>	1	<u>0</u>
G13	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1

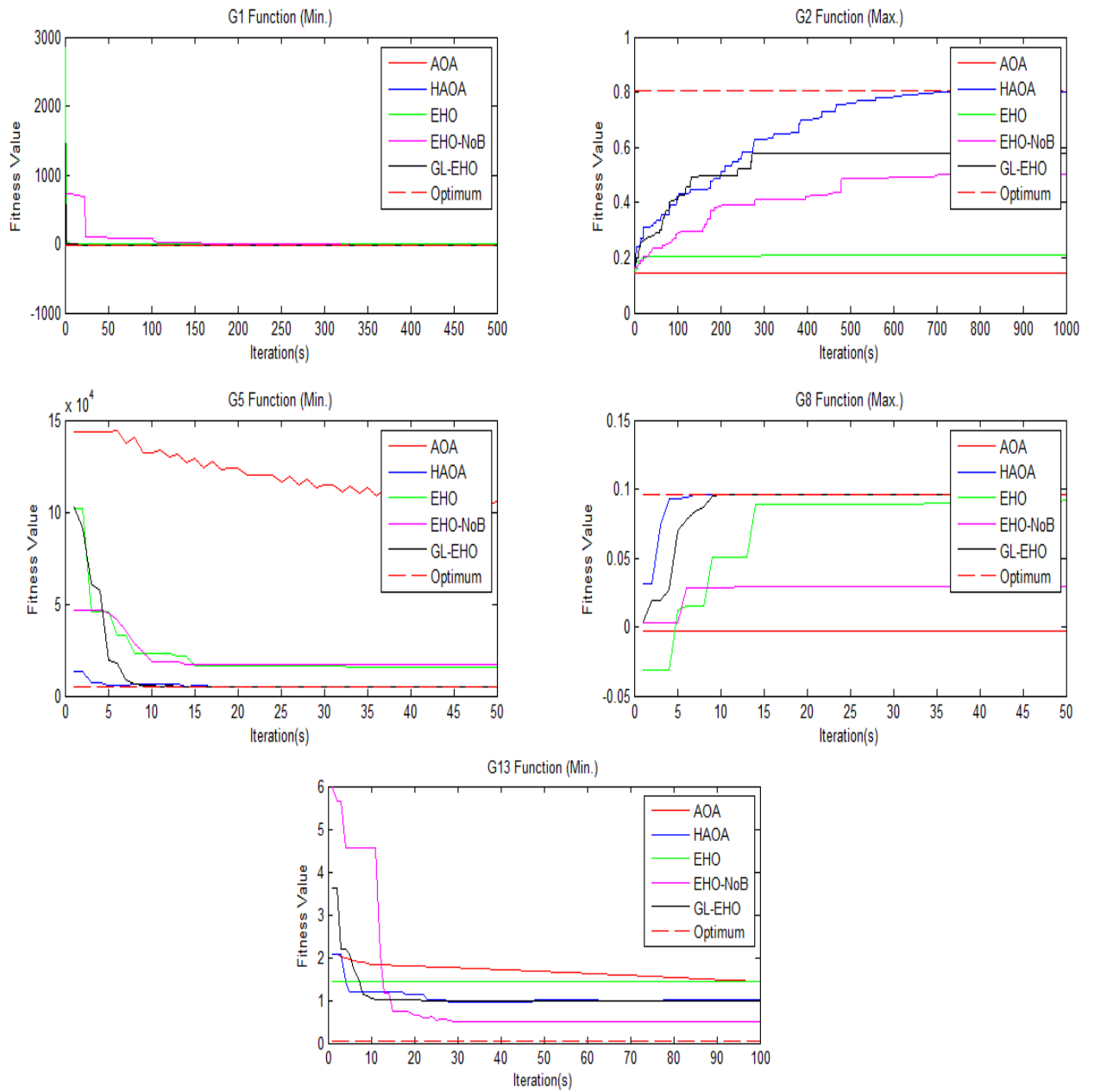


Figure 4. The convergence charts of HAOA, AOA, EHO, EHO-NoB, and GL-EHO for five benchmark problems

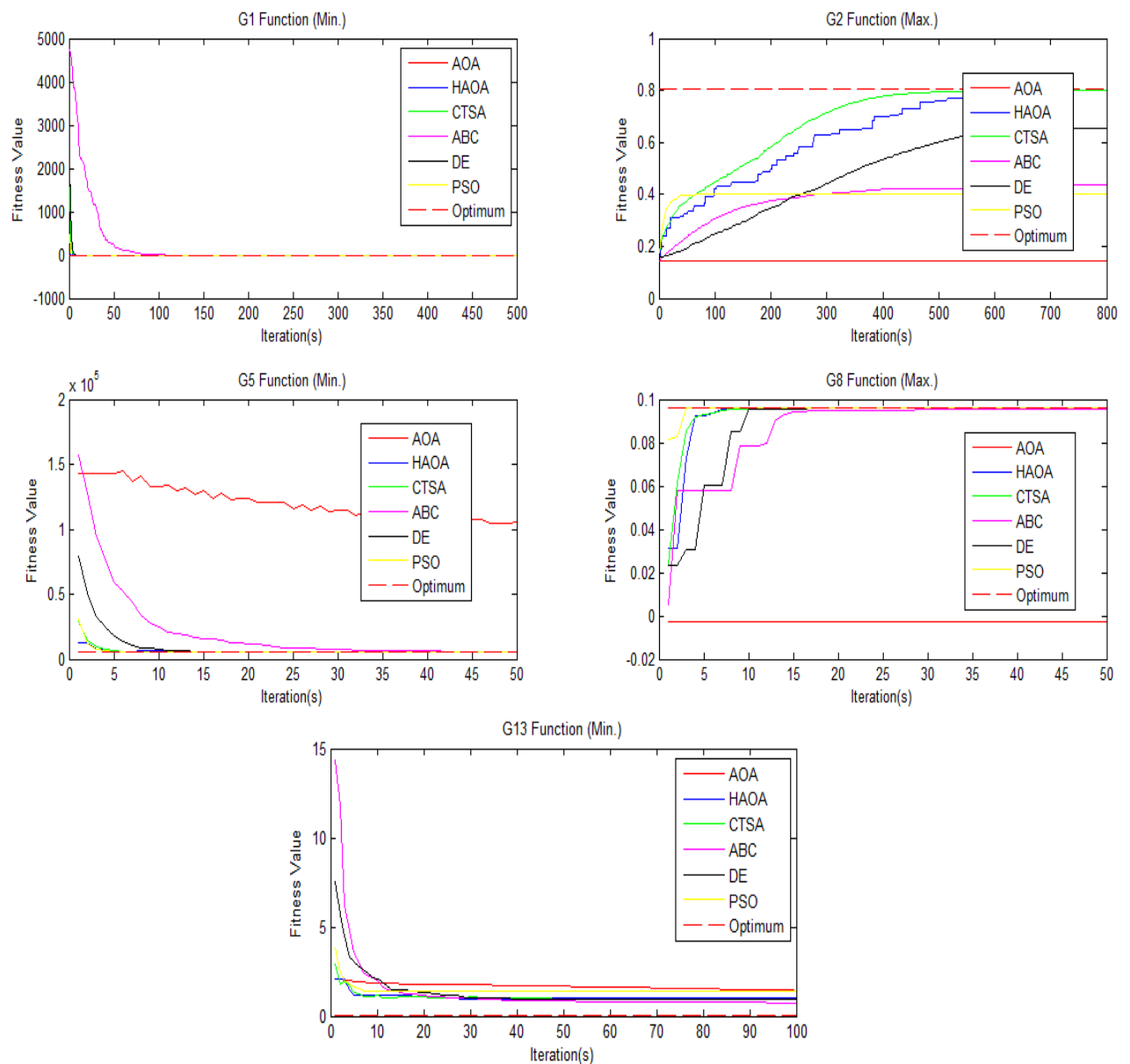


Figure 5. The convergence charts of HAOA, AOA, CTSA, ABC, DE, and PSO for five benchmark problems

3.3. A comparison of HAOA on the engineering design problems

In this subsection, HAOA has been applied to various engineering design problems. There are various engineering design problems in the literature (Braik, 2021). The best known of these are the Welded Beam Design problem (WBD), the Pressure Vessel Design problem (PVD), and Compression Spring Design (CSD). The mathematical models of these problems are taken directly from Babalik et al., (2018). Descriptions of these problems are given in the appendix section of Babalik et al.'s study (Babalik et al., 2018). In this study, $3E + 04$ as the maximum evaluation and 20 and 40 as the population sizes were selected, and we tested the success of AOA and HAOA in three different engineering design problems. 30 independent runs were carried out for each function for all the algorithms. The results of CTSA on engineering design problems have been obtained from Babalik et al. (2018). Population size and maximum evaluation parameters were chosen equally to make a fair comparison. In CTSA, the ST value was chosen as 0.2 and 0.5 in the population size of 20 and 40, respectively (Babalik et al., 2018).

Table 12 shows a comparing AOA, HAOA, and CTSA algorithms for population size=20 and 40 on various engineering design problems. Table 13 shows the results of the Wilcoxon Signed-Rank Test on the results of HAOA, AOA, and CTSA algorithms on various engineering design problems. Table 14 shows a comparing HAOA and other algorithms on various engineering design problems. Successful results are marked with bold font in Table 12 and Table 14. According to Table 12, HAOA is more successful than AOA and CTSA.

Table 12. Comparing AOA, HAOA, and CTSA algorithms for population size=20 and 40 on various engineering design problems

Problem	AOA		HAOA		CTSA	
	N=20	N=40	N=20	N=40	N=20	N=40
PVD						
<i>Best</i>	6719.607	6963.081	5901.344	5907.115	5930.4781	6053.1729
<i>Worst</i>	22315.94	15660.85	6077.501	5995.747	6459.0682	6398.9258
<i>Mean</i>	10593.84	9742.615	5977.512	5944.55	6104.2594	6194.5821
<i>SD</i>	3189.202	2200.163	48.08271	23.04729	-	-
WBD						
<i>Best</i>	2.630093	2.61196	2.380959	2.380958	2.382411	2.3901825
<i>Worst</i>	4.542383	3.806217	2.381671	2.381091	2.4807722	2.5505803
<i>Mean</i>	3.166143	3.158344	2.381056	2.380987	2.3891574	2.4290572
<i>SD</i>	0.403487	0.259825	0.000154	3.11E-05	-	-
CSD						
<i>Best</i>	0.012998	0.013167	0.012674	0.012671	-	-
<i>Worst</i>	0.032921	0.022827	0.012997	0.012763	-	-
<i>Mean</i>	0.014821	0.013552	0.012753	0.012704	-	-
<i>SD</i>	0.004934	0.001723	6.75E-05	2.82E-05	-	-

Table 13. The results of the Wilcoxon Signed-Rank Test on the results of HAOA, AOA, and CTSA algorithms on various engineering design problems

HAOA	AOA				CTSA			
	N=20		N=40		N=20		N=40	
	<i>P-Value</i>	<i>h</i>	<i>P-Value</i>	<i>h</i>	<i>P-Value</i>	<i>h</i>	<i>P-Value</i>	<i>h</i>
PVD	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
WBD	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1	1.73E-06	1
CSD	1.73E-06	1	1.73E-06	1	-	-	-	-

Table 14. Comparing HAOA and other algorithms on various engineering design problems

PVD		$f(x)$	Fes	Reference
	HAOA	5907.115	30000	-
	AOA	6963.081	30000	-
	CTSA	6053.1729	30000	Babalik et al., 2018
	GWO	6051.56390000	N/A	Mirjalili et al., 2014
	MFO	6059.71430000	N/A	Mirjalili, 2015
	WOA	6059.74100000	6300	Mirjalili and Lewis, 2016
WBD				
	HAOA	2.380958	30000	-
	AOA	2.61196	30000	-
	CTSA	2.3901825	30000	Babalik et al., 2018
	HS	2.38070000	110000	Lee and Geem, 2005
	Deb	2.43311600	5000	Deb, 1991

4. CONCLUSION

The use of heuristic algorithms in solving real-world problems has increased in recent years. This is due to their success in problem-solving. AOA is a newly developed heuristic algorithm. It uses four arithmetic operations in its structure. The addition and subtraction operators enhanced the AOA's local search capability, while the multiplication and division operators enhanced the AOA's global search capability. It has been hybridized with the TSA algorithm to increase the success of AOA. Thus, hybrid AOA (HAOA) has been proposed. The seed production mechanism of TSA is placed in the random walking stage of AOA. New candidate solutions (seeds) have been produced with the arithmetic operators involved in AOA and the candidate solutions have been compared with the existing solutions. Thus, the performance of AOA has increased. In this study, the success of AOA and HAOA was tested in thirteen constrained optimization problems. There are four maximization and nine minimization problems. The success of AOA and HAOA has been tested for their performance in six different population sizes. Statistical test was applied to the obtained results. The results proved the superiority of HAOA. HAOA has been compared with other heuristic methods (ABC, DE, GA, PSO, EHO, EHO-NoB, HEHO, and GL-EHO) in the literature and the success of HAOA has been shown. In addition, the success of AOA and HAOA has also been tested in three different engineering design problems. The results obtained were evaluated and compared. HAOA's success has been proven.

Since the AOA algorithm is a new algorithm, its performance has not been tested on different problems. In future studies, the performance of AOA on discrete and binary optimization problems is considered.

REFERENCES

- Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Elaziz, MA., Gandomi, A.H., (2021), The Arithmetic Optimization Algorithm, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 376 (2021) 113609.
- Aslan, M., Beskirli, M., Kodaz, H., Kiran, M.S., (2018), An Improved Tree Seed Algorithm for Optimization Problems, *International Journal of Machine Learning and Computing*, Vol. 8, No. 1.
- Babalik, A., Cinar, A.C., Kiran, M.S., (2018), A modification of tree-seed algorithm using Deb's rules for constrained optimization, *Applied Soft Computing* 63, 289–305.
- Bansal, J.C., Joshi, S.K., Sharma, H., (2018), Modified global best artificial bee colony for constrained optimization problems, *Computers and Electrical Engineering* 67, 365–382.
- Beşkirli, A., Özdemir, D., Temurtaş, H., (2020), A comparison of modified tree-seed algorithm for high-dimensional numerical functions, *Neural Computing, and Applications*, 32:6877–6911.

- Braik, M.S., (2021), Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems, *Expert Systems With Applications* 174, 114685.
- Cinar, A.C., Korkmaz, S., Kiran, M.S., (2020), A discrete tree-seed algorithm for solving symmetric traveling salesman problem, *Volume 23, Issue 4, Pages 879-890*.
- Deb, K., (1991), Optimal design of a welded beam via genetic algorithms, *AIAA J.* 29(11) (1991) 2013–2015.
- El-Fergany, A., Hasanien, H.M., (2018), Tree-seed algorithm for solving optimal power flow problem in large-scale power systems incorporating validations and comparisons, *Applied Soft Computing*, Volume 64, Pages 307-316.
- Garg, H., (2016), "A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems", *Applied Mathematics and Computation*, 274, 292-305. doi:10.1016/j.amc.2015.11.001.
- Haklı, H., (2019), A Novel Approach Based On Elephant Herding Optimization For Constrained Optimization Problems, *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech.*, v.7, n.2, pp. 405-419.
- Jiang, J., Meng, X., Chen, Y., Qiu, C., Liu, Y., Li, K., (2020), Enhancing tree-seed algorithm via feed-back mechanism for optimizing continuous problems, *Applied Soft Computing*, Volume 92, 106314.
- Kiran, M.S., (2015), TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization, *Volume 42, Issue 19, Pages 6686-6698*.
- Kohli, M., Arora, S., (2017), "Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems", *Journal of Computational Design and Engineering*, In Press. Doi:10.1016/j.jcde.2017.02.005.
- Lin, C. H., (2013), "A rough penalty genetic algorithm for constrained optimization", *Information Sciences*, 241, 119-137. Doi:10.1016/j.ins.2013.04.001.
- Lee, K.S., Geem, Z.W., (2005), A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice, *Comput.Methods Appl. Mech. Eng.* 194 (36) (2005) 3902–3933.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A., (2014), Grey wolf optimizer, *Adv. Eng. Software* 69(2014) 46–61.
- Mirjalili, S., (2015), Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm, *Knowledge-Based Systems* 89 (2015) 228–249.
- Mirjalili, S., Lewis, A., (2016), The whale optimization algorithm, *Adv. Eng. Software* 95(2016) 51–67.
- Runarsson, T.P., Yao, X., (2000), "Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization", *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, 4(3), 284-294. Doi: 10.1109/4235.873238.
- Strumberger, I., Bacanin, N., Tuba, M., (2018), "Hybridized Elephant Herding Optimization Algorithm for Constrained Optimization", *Cham.* 158-166.
- Xu, B., Chen, X., Tao, L. L., (2018), "Differential evolution with adaptive trial vector generation strategy and cluster-replacement-based feasibility rule for constrained optimization", *Information Sciences*, 435, 240-262. Doi:10.1016/j.ins.2018.01.014.



ESNEK ROBOT KOL SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK BELİRLENMESİ

¹Semih ÖZKAYA , ²Çağlar CONKER , ³Hasan Hüseyin BİLGİÇ 

^{1,3} İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE
² İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE
¹semihozkaya.mfbe17@iste.edu.tr, ²caglar.conker@iste.edu.tr, ³hhuseyin.bilgic@iste.edu.tr

(Geliş/Received: 12.03.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.08.2021)

ÖZ: Sunulan çalışma, bir esnek robot kol sisteminin hareket kontrolüne yönelik LQR denetleyici tasarımı ile kontrol parametrelerinin optimizasyonu hakkında ayrıntılı analizler sunmaktadır. Optimizasyonun temel amacı esnek robot kol sisteminin istenilen açısal konuma en hızlı şekilde gelmesini sağlamak ve uç sapmalarını ortadan kaldırmaktır. Titreşimli Parçacık Sistemi algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR ağırlık matrislerinin ayarlanmasında kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliği, Genetik Algoritma ve Yapay Arı Kolonisi gibi iyi bilenen optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir çoklu amaç fonksiyonu da önerilmektedir. Optimizasyon algoritmalarına ait parametreler geniş bir arama uzayı taranarak belirlenmiş olup her algoritma dört farklı popülasyon değeri altında incelenerek 100 iterasyon için sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon algoritmaları ile elde edilen en iyi kontrol sonuçları, esnek robot kol sistemine uygulanarak elde edilen sonuçlar teorik ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Makale, tanıtılan optimizasyon algoritmalarının her biri için gerekli teorik arka plan ile uygulamaya yönelik ayrıntıları sunacak şekilde düzenlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Esnek robot kol, Doğrusal kuadratik regülatör, Genetik algoritma, Yapay arı kolonisi, Titreşimli parçacıklar sistemi algoritması

Determination of LQR Controller Parameters for Flexible Link Manipulator System Using Metaheuristic Algorithms

ABSTRACT: The presented study provides detailed analysis of the LQR controller design for motion control of a flexible link manipulator system with the optimization of control parameters. The main objective of proposed optimization ensures that the flexible link manipulator system reaches the desired angular position as soon as possible and eliminates tip deflections. The Vibrating Particle System algorithm used for the first time in the adjustment of LQR weight matrices with this study. The efficiency of the proposed approach has been showing by comparing it with well-known optimization algorithms such as Genetic Algorithm and Artificial Bee Colony. Also, multi-objective function is proposed that considers the important parameters of the control response for flexible link manipulator systems in this study. Parameters of optimization algorithms have been determined by searching a wide search space and each algorithm was examined in terms of four different population values in order to reach results for 100 iterations. Furthermore, the configurations that obtained the best control results for optimization algorithms are compared with each other according to the theoretical and experimental studies performed. The article is organized in a manner that presents the required theoretical background and the implementation-related details for each of the optimization algorithms introduced.

Keywords: Flexible link manipulator, Linear quadratic regulator, Genetic algorithm, Artificial bee colony, Vibrating particles system algorithm

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hareket kontrolüne yönelik çalışmalar, robotik ve otomasyonla ilgili araştırma alanlarının ana konularından biri haline gelmiştir. Modern imalat endüstrisinde, yüksek hızlı üretim için yüksek hız ve hassas hareket kontrolü gereklidir. Ancak, yüksek hız gereksinimi, artık titreşimler nedeniyle hassas hareket kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, hareket hızı ile artık titreşimlerin ortadan kaldırılması veya en azından azaltılması arasında bir denge bulunması, hareket kontrol çalışmalarının ve ilgili pratik uygulamaların önemli bir parçası haline gelmiştir. Esnek robotik sistemler; robot manipülatörler, vinçler, koordinat ölçüm makineleri, uzay araçları vb. geniş bir alanda kullanılmaktadır (Conker ve diğ., 2014; Bilgiç ve diğ., 2021). Bu nedenle esnek robot kol (ERK) sistemleri, çeşitli kontrol tekniklerinin performansını incelemede sıklıkla kullanılmaktadırlar. Geleneksel olarak ERK'nin kontrolünde lineer kontrol yöntemlerinden olan LQR (doğrusal kuadratik regülatör) (Mansour ve diğ., 2008) ve PID (oransal-integral-türevsel) (Fahmy ve diğ., 2012) kontrolörler kullanılmaktadır. PID denetleyiciler, basit yapıları nedeniyle çeşitli kontrol problemleri için sıklıkla tercih edilmektedir. PID denetleyici kazançlarının hassas olarak ayarlanması özellikle hassas pozisyon kontrolü veya hız kontrolü gibi uygulamalarda oldukça önemlidir (Önen ve diğ., 2019). Lineer kontrol yöntemlerinden bir diğer yaklaşım ise optimal durum-uzay geri besleme yöntemi olan LQR denetleyicilerdir. Bu yaklaşımda kontrol sinyali, performans indeksi ve durum-uzay matrisleri kullanılarak ayarlanmaktadır. Q ve R olarak gösterilen ağırlık matrislerinin belirlenmesi LQR performansının en önemli kısmını oluşturmaktadır. Geleneksel olarak PID ve LQR teknikleri için kontrol parametrelerinin hassas olarak ayarlanmasında deneme/yanılma yöntemi kullanılmaktadır (Lahdhiri ve Elmaraghy, 1999). Kontrol parametrelerini belirlemek için deneme/yanılma yönteminin kullanılması hem zaman almakta hem de en iyi çözümü elde etmekte güvence vermemektedir.

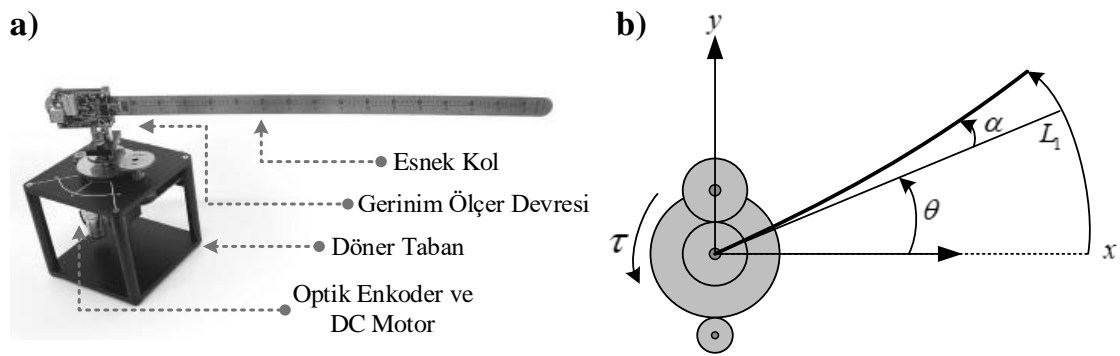
ERK'nin sistemlerinin kontrolü için literatürde doğrusal olmayan birçok kontrol yaklaşımı bulunmaktadır. Geri beslemeli doğrusallaştırma (feedback linearization) (Huang ve Lin, 2008), geri adımlamalı (back stepping) (He ve diğ., 2012), geri besleme stabilizasyonu (output feedback stabilization) (Jnifene, 2007), gecikmeli geri besleme (delayed feedback) (Pieper, 1998), H^∞ (D. G. Wilson ve diğ., 2002), ve kayan kipli kontrol (Sooraksa ve Chen, 1998) gibi bir dizi doğrusal olmayan kontrol yöntemi ERK sistemlerinin kontrolünde kullanılmıştır. Doğrusal olmayan kontrol teknikleri, doğrusal olmayan sistemlerin takibi ve stabilizasyonu gibi problemlerde avantajlı olmasına rağmen bu yapıların uygulanması kontrol teknikleri arasında göreceli olarak zor ve karmaşıktır. Literatürde ERK sistemlerini kontrol etmek için, bulanık mantık (Talebi ve diğ., 1998) ve yapay sinir ağları (Cao ve diğ., 2010) gibi yapay zeka temelli kontrol teknikleri önerilmiştir. ERK kontrol sistemlerinde kontrolcü performansını iyileştirmek için; bulanık mantık tabanlı PID kontrolü (Tinkir ve diğ., 2010), bulanık mantık tabanlı kayan kip kontrolü (Mirshekaran ve diğ., 2013), yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolü (Siddique ve diğ., 2002) ve genetik algoritmaya dayalı nöro-bulanık kontrol (Wongsathan ve diğ., 2009) gibi bir veya daha fazla kontrol yöntemi kullanılarak bir dizi hibrit kontrol tekniği geliştirilmiştir. Denetleyici tasarımında yapay zeka teknikleri temelli metasezgisel optimizasyon algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır (Moura Oliveira , 2005; Jans ve Degraeve, 2007; Abdel-razak ve diğ., 2019, Bilgiç ve diğ., 2021). Genetik algoritma (Wongsathan ve diğ., 2009), parçacık sürü optimizasyonu (Çınaroğlu ve Bulut, 2018), yapay arı kolonisi algoritması (Bingul ve Karahan, 2018), arı algoritması (Bilgiç ve diğ., 2016), karınca kolonisi optimizasyonu (Jacknoon ve Abido, 2017) ve bozkurt algoritması (Sen ve Kalyoncu, M., 2020) farklı mühendislik problemlerinin optimizasyonunda sıklıkla kullanılan metasezgisel algoritmalarlardır.

Bu çalışma, esnek robot kol sistemi için LQR denetleyici ağırlık matrislerinin optimizasyonunda genetik algoritma (GA), yapay arı kolonisi (ABC) ve titreşimli parçacık sistemi (VPS) algoritmalarının tasarım ve performans analizleri sunmaktadır. En iyi optimizasyon sonuçlarını elde etmek için, GA, ABC ve VPS algoritmalarının farklı popülasyon/parçacık sayıları altındaki kontrolcü performansları incelenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçları; ulaşılan minimum amaç fonksiyonu değeri, optimizasyon süresi ve ideal popülasyon/parçacık sayısına göre karşılaştırmalı olarak tablo ve grafiklerle

sunulmuştur. Optimizasyon algoritmaları ile elde edilen en iyi kontrol sinyalleri esnek robot kol sistemine uygulanarak sistemden elde edilen servo konum ve esnek kol uç sapmaları; yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşma değeri, kararlı durum hatası gibi birçok performans kriterine göre değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen VPS algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda VPS algoritmasının, düşük popülasyon veya parçacık sayılarında, GA ve ABC algoritmalarına göre daha hızlı bir yakınsama oranı sağlayarak daha kısa sürede sonuca ulaştığı gösterilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir amaç fonksiyonu da önerilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Çalışma kapsamında optimize edilmiş LQR kontrolörü için yapılan deneysel çalışmalar, Quanser firması tarafından üretilen esnek robot kol (ERK) sisteminde gerçekleştirilmiştir. Esnek robot kol sistemi, bir DC motor ile yatay olarak çalıştırılan elastik bir uzuvdan meydana gelmektedir. DC servo motor ve motor milinin açısal konumu, elastik uzvun uç noktasına yerleştirilmiş bir enkoder ile ölçülmektedir. ERK sistem modeli ile şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır. Şekil 1'de belirtilen α , θ ve τ değerleri; sırasıyla esnek robot kolun uç sapma açısını, servo motor açısını ve motor tarafından üretilen torku temsil etmektedir.



Şekil 1. Esnek robot kol sisteminin mekanik modeli (a) ve şematik (b) gösterimi

Figure 1. a Mechanical model and b) Schematic illustration of the flexible link manipulator)

Esnek Robot Kol Sisteminin Modellenmesi (Modelling of the Single-Link Flexible Manipulator System)

Esnek Robot Kol sisteminin dinamik modeli, çoklu eklemlere sahip robot manipülatörleri gibi karmaşık robotik sistemler için kullanılan Lagrange yöntemi ile elde edilmiştir. Esnek robot kol sisteminin hareket denklemleri Eş. 1 ve Eş. 2'de sunulmaktadır.

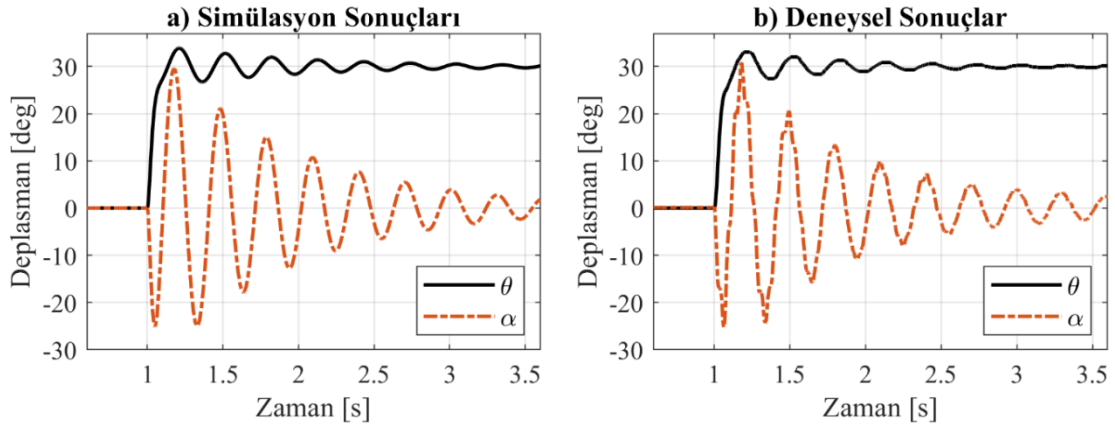
$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}} \alpha + \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (1)$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\alpha} + K_s \left(\frac{J_{link} + J_{eq}}{J_{link} J_{eq}} \right) \alpha - \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (2)$$

ERK sisteminin matematiksel modeli hakkında ayrıntılı bilgilere Quanser tarafından yayınlanan ürün kataloğu üzerinden ulaşılabilir (Quanser Inc. 2011). Çizelge 1'de ERK sistemine ait parametreler ile sayısal değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 1. Esnek robot kol (ERK) sistemine ait parametreler ve sayısal değerleri (Quanser Inc. 2011)**Table 1.** Parameters and numerical values of the flexible link system (Quanser Inc. 2011)

Sembol	Açıklama	Değer
B_{eq}	Dişli eşdeğer viskoz sönüm oranı	0.004 N.m.s/rad
J_{link}	Esnek robot kol atalet momenti	0.0038 kg.m ²
J_{eq}	Büyük-Dişli eşdeğer atalet momenti	0.0026 kg.m ²
η_g	Dişli kutusu verimi	0.9
η_m	Motor verimi	0.69
R_m	Motor armatür direnci	2.6 Ω
K_s	Esnek kol için esneklik katsayısı	1.3522
K_m	Zıt emk sabiti	0.00767 V/(rad/s)
K_t	Motor tork sabiti	0.00767 N.m/A
K_g	Planet dişli kutusu oranı	14:5
V_M	Motor giriş voltajı	-

**Şekil 2.** Esnek robot kol sistemine ait teorik (a) ve deneysel (b) sonuçlar**Figure 2.** Flexible link simulation (a) and experimental (b) results for a step input

Eş. 1 ve Eş. 2 ile sunulan ERK sisteminin matematiksel modeli, doğrusal kuadratik regülatör (LQR) denetleyiciye ait ağırlık matrislerinin ayarlanmasında kullanılmıştır. ERK sistemine uygulanan basamak girişi için elde edilen motor konumu (θ) ile uç sapmasına (α) ait sonuçlar teorik (a) ve deneysel (b) olarak Şekil 2’de sunulmaktadır. Servo motorun konumu ve esnek uzuv uç sapması gibi açısal değerler derece olarak gösterilmektedir. Şekil 2’de sunulan teorik (a) ve deneysel (b) sonuçların yakından eşleşmesi, ERK sisteminin matematiksel olarak gerçekçi bir şekilde modellendiğini göstermektedir.

Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR) Kontrolör Tasarımı (Design of the Linear Quadratic Regulator (LQR) Controller)

Doğrusal kuadratik regülatör (LQR), çeşitli kontrol problemleri için sıklıkla tercih edilen bir tam durum geri besleme kontrol tekniğidir. LQR kontrol performansını etkileyen en önemli parametreler Q ve R ile sembolize edilen ağırlık matrislerine ait değerlerinin belirlenmesidir. Sistem modelinin doğrusal zamanla değişmeyen durum-uzay temsili ile kuadratik maliyet fonksiyonu, sırasıyla Eş. 3 ve Eş. 4’te sunulmaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitlikte belirtilen x ve u değerleri sırası ile durum vektörü ve kontrol sinyalini, A , B ve C ise sırası ile durum, girdi ve çıktı matrislerini temsil etmektedir. Eşitliklerde belirtilen üst simge T , matrisin transpozunu ifade etmektedir. $u=K(\text{referans}-x)$ sistemi stabilize eden ve J performans indeksini en aza indirmeyi amaçlayan durum geri besleme kontrol sinyalidir. K kontrolcü kazancı ise Eş. 5'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (5)$$

Eş. 5'de belirtilen P , Ricatti eşitliğinin çözümünden elde edilen simetrik matrisi ifade etmektedir.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (6)$$

Q ve R diyagonal matrisleri, performans indeksini azaltmak için LQR denetleyici tasarımında sistem girişini hesaplamakta kullanılmaktadır. Eş. 7 de belirtilen Q , ağırlık matrisi ve R , sistem matrisini ifade etmektedir.

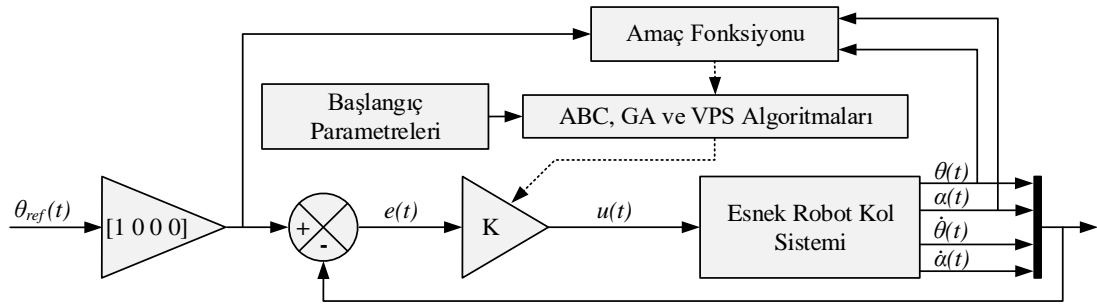
$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_n \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

İstenilen kontrol kriterlerinin sağlanması için Q ve R matrislerine ait değerlerin ayarlanması gerekmektedir. Geleneksel olarak Q ve R kontrol parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntem, deneme/yanılma yaklaşımıdır. Deneme/yanılma yönteminin başarısı tasarımcının deneyimine bağlı olmakla birlikte bu yaklaşım en iyi çözümü elde etmek için garanti vermediği gibi genellikle uzun süreler gerekmektedir.

LQR Kontrolör Çok Amaçlı Optimizasyonu (Multi-Objective Optimization Of The LQR Controller)

Bu bölümde, LQR denetleyici tasarımı ile kontrol parametrelerinin optimizasyonunda metasezgisel algoritmaların kullanımı açıklanmaktadır. Sunulan çalışmada Genetik Algoritma (GA), Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Titreşimli Parçacık Sistemi (VPS) algoritmaları, LQR denetleyicinin ağırlık matrislerini optimize etmek ve kontrolcü cevabını iyileştirmek için kullanılmaktadır. Tasarlanan kontrol sisteminin amacı, esnek robot kolun bağlı olduğu servo motoru mümkün olan en hızlı şekilde hareket ettirerek noktadan noktaya hareket kontrolünü sağlamak ve sistemde meydana gelen artık titreşimleri ortadan kaldırmaktır. Şekil 3'te sunulan blok diyagramında, LQR kontrol parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonunda kullanılacak yaklaşım ana hatları ile gösterilmektedir.

Şekil 3'te görüleceği üzere, optimizasyon algoritmaları kullanıldığında Q ve R matrislerini ayarlamak için bir amaç fonksiyonu gerekmektedir. Çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol cevabının önemli parametrelerini dikkate alan ve objektif ağırlıklandırma yöntemini kullanan çoklu amaç fonksiyonu önerilmektedir.



Şekil 3. LQR kontrol parametrelerinin optimal ayarı için geliştirilen kontrol sistemine ait genel blok diyagramı

Figure 3. Block diagram for optimal tuning of LQR control parameters

Önerilen çoklu amaç fonksiyonunda, esnek sistemlerin kontrol performansını belirleyen birçok alt fonksiyon tek bir amaç fonksiyonu altında birleştirilmiştir. Alt fonksiyonlara ait ağırlık katsayıları ise deneysel olarak belirlenmiştir. Eş. 8’de J_{sum} olarak ifade edilen amaç fonksiyonu, sistemin zaman tepkisinden elde edilen tepe zamanı, yükselme süresi, yerleşme zamanı, kalıcı durumu hatası ve maksimum aşma gibi parametreleri optimize etmeyi amaçlamaktadır. Eş. 8’de önerilen çoklu amaç fonksiyonu, mevcut birçok çalışmanın (Çınaroğlu ve Bulut, 2018, Bilgiç ve diğ., 2021) incelenmesi ile tasarlanmıştır.

$$J_{sum} = J_{\theta} + J_{\alpha}$$

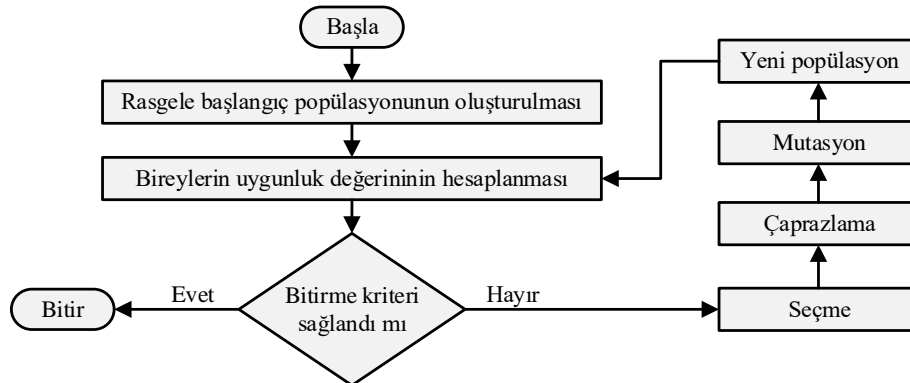
$$J_{\theta} = (10 t_r(\theta)) + (6 t_s(\theta)) + (6.5 t_p(\theta)) + (0.1 |\max s_p|(\theta)) + (4.4 |\max s_s - ref|(\theta)) \quad (8)$$

$$J_{\alpha} = (0.1 \text{norm}(\alpha)) + (3.3 t_s(\alpha)) + (50 t_p(\alpha)) + (0.8 |\max s_p|(\alpha)) + (1500 |\max s_s - ref|(\alpha))$$

Eş. 8’de α esnek robot kolun uç açısını, θ servo motor açısını, t_r yükselme zamanını, t_s yerleşme zamanını, t_p tepe zamanını, s_p maksimum aşmayı, s_s kalıcı durum hatasını, “norm” matematiksel normu ve “ref” referansı simgelemektedir.

Genetik Algoritma (GA) (Genetic Algorithm)

John Holland (Holland, 1992) tarafından önerilen Genetik Algoritma (GA), karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Genetik Algoritmanın tercih edilmesinin temel sebebi, geniş bir alanın taranmasına yönelik işlemleri kısa sürede tamamlayarak uygun bir çözüme kavuşturmasıdır.



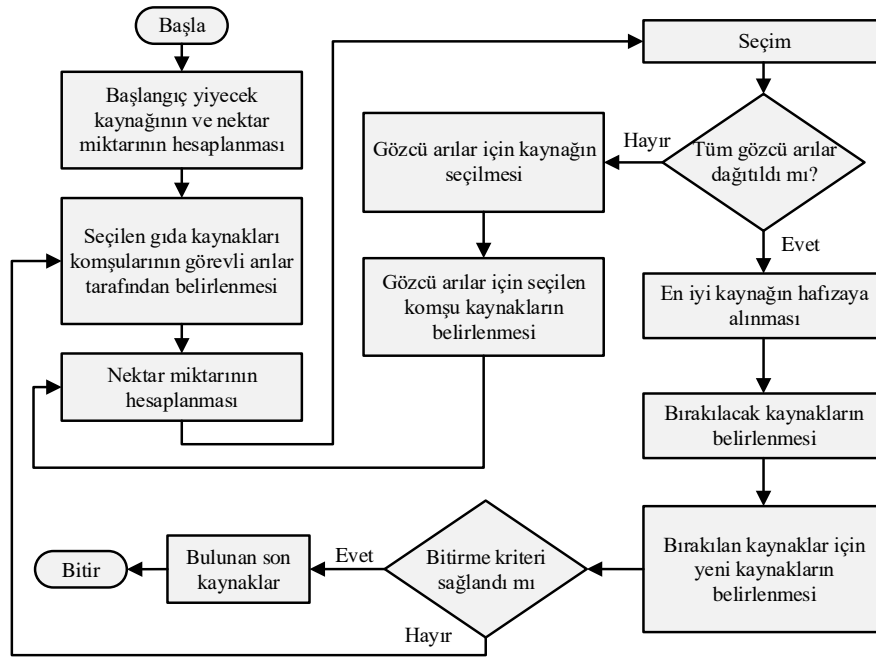
Şekil 4. Genetik Algoritma (GA) program akış şeması

Figure 4. Flowchart of the Genetic Algorithm (GA)

Evrım teorisinde konu edilen doğal seçim, genetik algoritmanın temelini oluşturduğundan dolayı genetik algoritma ve evrım teorisi birbiriyle bağlantılıdır. Genel olarak Genetik Algoritma doğal seçim sistemini organize ederek genlerin sonraki nesillere aktarımını sağlamaktadır. GA'ya ait program akış şeması Şekil 4'te sunulmaktadır. GA'nın başlangıç noktası 0 ve 1'lerden meydana gelen rastgele oluşturulmuş bireylerin (kromozomların) üretilmesinden meydana gelmektedir. Süreçte yeni bir popülasyon üretilirken, önceki popülasyondan elde edilen veriler kullanılmaktadır. Üretilen kromozomun uygunluğu, her iterasyon için optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu dikkate alınarak belirlenmektedir. Belirlenen uygun değerler, doğal seleksiyon periyodu ile daha iyi özelliğe sahip yeni nesillere dönüştürülmektedir. Bu süreçte Genetik Algoritmada temel olarak belirlenen seçme, çaprazlama, mutasyon ve yeni popülasyon üretimi işlemleri uygulanmaktadır. Yeni nesil oluşumunda aynı kromozomlara sahip tekrar eden seçimler sürekli kendini tekrar eden konuma gelebilmektedir. Bu nedenle kromozomlar mutasyon sürecine tabi tutularak, yeni kromozomlardaki uçların küçük parçalarında değişiklikler yapılarak sonraki geçiş dönemleri için spesifik kromozomlarla yeni bir nesil oluşturmaktadır. Sonrasında, yeni aday çözüm kromozomları, algoritmanın sonraki nesillerinde kullanılabilir. Süreç içerisinde her yeni oluşturulan nüfusun mevcut nüfustan daha iyi olması arzu edilmektedir. Bu sayede algoritma, daha uygun kromozomların bulunmasına olanak sağlamaktadır. Bu işlem, uygun bir çözüm veya maksimum iterasyon sayısı elde edilene kadar devam etmektedir. GA zaman kısıtlamalarını dikkate alan literatürdeki başarılı algoritmalarından birisidir.

Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm)

Yapay Arı Kolonisi (ABC), karmaşık optimizasyon sorunlarına çözümler bulmak için Derviş Karaboğa (Karaboga, 2017) tarafından önerilen bir diğer iyi bilinen akıllı arama algoritmasıdır. ABC algoritması, arılar ile kaynaklar arasındaki etkileşimden ilham alarak oluşturulmuştur. ABC algoritması yapay arıları üç gruba ayırmaktadır. Bunlar kâşif arılar, gözcü arılar ve işçi arılardır. İşçi arılar, gıda kaynaklarını araştırmakta ve gıdaların bulunduğu yer hakkındaki bilgiyi koloni arılarıyla paylaşmaktadırlar. Yukarıda bahsedilen her bir arı sadece bir besin kaynağından sorumludur. İşçi arılar kovandaki gözcü arılar için besin kaynağı bilgisi sağlamaktadır. Başlangıç olarak, işçi arı gıda kaynağını boşaltmaktadır.



Şekil 5. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması program akış şeması

Figure 5. Flowchart of the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm

Kaynakların tükenmesi sonrası işçi arılar, kâşif arılara dönüşmekte ve kovanın etrafında yeni yiyecek kaynakları aramaya başlamaktadır. Bir gıda kaynağının durumu, uygun bir problem için bir çözüm adayı olabilmektedir. Yiyecek kaynağı ve nektar miktarı, amaç fonksiyonun değerini belirlemektedir. ABC algoritmasına ait program akış şeması Şekil 5’de sunulmaktadır (Çınaroğlu ve Bulut, 2018). Algoritma, arıların arama alanına rastgele yerleştirilmesi ve ilk çözümlerin üretilmesiyle başlamaktadır. $i = 1; 2; \dots; SN$ (SN kaynakların sayısını göstermektedir) için her bir kaynak D -boyutlu bir vektördür. Arama uzayı $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{iD})^T$ değeri i ’nci gıda kaynağının pozisyonuna karşılık gelmektedir. İşçi arıların her biri aşağıdaki eşitlikle değiştirilmiş bir gıda kaynağı pozisyonu araştırmakta ve üretmektedir:

$$x_{ij}' = x_{ij} + r_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (9)$$

Eş.10’da $j \in 1, 2, \dots, D$ ve $k \in 1, 2, \dots, SN$ rastgele seçilmiş indekslerdir ve $k \neq i$ ’dir. r_{ij} parametresi de $[-1; 1]$ alanı içerisindeki rastgele bir sayıdır. Gözcü arı gıda kaynağı hakkında veri elde ettikten sonra, Eş. 10’da gösterilen P_i olasılığına dayanarak X_i gıda kaynağı bölgesini hesaplamaktadır:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (10)$$

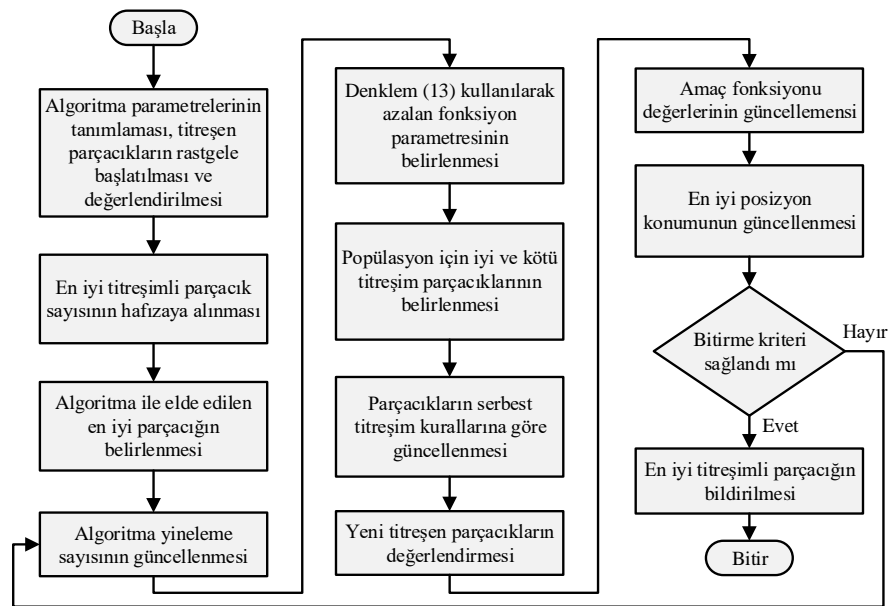
Uygunluk değeri fit_i ’i hesaplamak amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)}, & f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)|, & f(x_i) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Eş.11’de X_i kaynağının amaç fonksiyonu $f(x_i)$ ile temsil edilmektedir. Elde edilen kaynak değerlerinin en iyi durdurma kriterlerinin uygunluğuna bakılır ve uygunluğu doğrultusunda ise işlem sona erer. Eğer aksi bir durum söz konusuysa komşu kaynaklar incelenir ve yeni kaynaklar aranmaya başlanır. Yapay arı kolonisi hakkında detaylı bilgilere literatürde sunulan kaynaklardan ulaşılabilir (Bingül ve Karahan, 2018).

Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS) Algoritması (Vibrating Particles System Algorithm)

Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS), 2017 yılında Kaveh ve Ghazaan tarafından önerilen yeni bir metasezgisel arama algoritmasıdır. Yakın zamanda önerilen bir algoritma olmasına karşın süreç planlaması, parametre tahmini, imalat vb. birçok alanda kullanılmaktadır (Fathi ve diğ., 2021; Kaveh ve diğ., 2021). VPS algoritması temel olarak sönümlü, tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimine dayanmaktadır. Algoritma, ilk olarak rastgele çözümlerle başlamakta ve bunları sönümlü, tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşimi olarak incelemektedir. Düşük sönüm koşulları dikkate alındığında, serbest titreşimli sistemler veya titreşimli parçacıklar salınım yapmakta ve diferansiyel denklemler yardımıyla ifade edilen belirli bir algoritmaya göre denge konumuna geri dönmektedir. VPS algoritması optimizasyon süresince elde edilen sonuçların rastgele bir şekilde kullanılması ve sonuçların bir kombinasyonu alınarak parçacıkların derecesini en iyi kriterler sağlanana kadar döngü içerisinde tekrar ettirmektedir. VPS algoritması her parçacığın kararlılık pozisyonunu, tüm popülasyonda elde edilen en iyi konum (HP), iyi parçacık (GP) ve kötü parçacık (BP) olmak üzere üç alt kategori altında sınıflandırmaktadır. Titreşimli parçacık sistemi algoritmasının temeli, kendini uyarılma, işbirliği ve rekabet olarak sıralanabilecek üç temel kavram üzerinde durmaktadır. VPS algoritması, uyum arama stratejisine dayanmakla birlikte bellek kullanımını da optimize etmektedir. Ayrıca algoritma arama alanından çıkan titreşimli parçacıkların konumunu düzeltmektedir. VPS algoritmasına ait program akış şeması Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Titreşim Parçacıkları Sistemi (VPS) algoritması program akış şeması

Figure 6. Flowchart of the Vibration Particles System (VPS) algorithm

Tek serbestlik dereceli kritik altı sönümlü titreşimler için sistemin çözümü Eş. 12'de gösterilmektedir:

$$x(t) = \rho e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_D t + \phi) \quad (12)$$

Eş.12'de ω_n sistemin doğal frekansını, ξ sistemin sönüm oranını, ρ ve ϕ titreşimin başlangıç koşulları ile belirlenen sabit değerleri ifade etmektedir. VPS algoritmasında her bir parçacık için farklı ağırlıkları olan üç denge pozisyonu bulunmaktadır. HP - Tüm popülasyonun süresi boyunca elde edilen en iyi konumu, GP - İyi bir parçacığı ve BP - Kötü bir parçacığı ifade etmektedir. Mevcut popülasyon, her bir çözüm adayını için GP ve BP'yi seçerek artan bir sırayla amaç fonksiyon değeri açısından hizalanmaktadır. Sistemin serbest titreşimindeki salınım genliklerinin azalma oranını belirleyen

parametre sönüm oranıdır. Azalma fonksiyonu (D) VPS algoritmasının sönüm seviyesinin ayarlanması için tanımlanır. Azalma fonksiyonu D Eş.13'te gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$D = \left(\frac{NITs}{\max NITs} \right)^{-\alpha} \quad (13)$$

Eş.13'teki NITs ve maxNITs, sırasıyla mevcut iterasyon ile maksimum iterasyon sayısını temsil etmekte, α ise azalma fonksiyonuna ait sabiti göstermektedir. Yukarıdaki tanımlara göre, VPS algoritmasının güncelleme kuralları Eş.14'te gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} newVP_i &= \omega_1 (D.A.rand + HP) + \omega_2 (D.A.rand + GP_i) + \omega_3 (D.A.rand + BP_i) \\ A &= \omega_1 (HP - VP_i) + \omega_2 (GP_i - VP_i) + \omega_3 (BP_i - VP_i) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0$$

Eş.14'teki VP_i titreşimli parçacığın mevcut konumunu, $newVP_i$ ise titreşimli parçacığın güncellenmiş konumunu temsil etmektedir. ω_1 , ω_2 ve ω_3 ağırlıkları sırasıyla en iyi parçacığın (HP), iyi parçacığın (GP) ve kötü parçacığın (BP) göreceli önemini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde LQR denetleyici parametrelerinin optimize edilmesinde GA, ABC ve VPS algoritmalarının performanslarının değerlendirilmesine yönelik teorik ve deneysel çalışmalara yer verilmektedir. VPS algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR kontrol parametrelerinin optimizasyonunda kullanılmış olup elde edilen sonuçlar diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılarak VPS algoritmasının avantajları gösterilmiştir. Ayrıca, sunulan çalışma ERK sistemi için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir amaç fonksiyonunun tasarımına yönelik detayları da sunmaktadır. Çalışma kapsamında sunulan algoritmalar 8 GB belleğe sahip Intel Core i5 CPU 1.8 GHz PC'de çalıştırılmıştır. LQR kontrolörüne ait ağırlık matrislerinin optimize edilmiş değerlerinin etkinliği esnek robot kol sisteminde karşılaştırılmıştır. En iyi optimizasyon sonuçlarının elde edilebilmesi için, her algoritma dört farklı popülasyon veya parçacık değerleri (10, 20, 30, 40) altında 100 iterasyon için incelenmiştir. Ayrıca, her algoritma için en iyi kontrol sonuçlarını veren değerler birbirleriyle karşılaştırılarak optimizasyon algoritmalarının avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir. Optimizasyon algoritmalarına ait başlangıç parametreleri, tasarlanan amaç fonksiyonu için geniş bir aralık taranarak incelenmiştir. Çizelge 2, GA, ABC ve VPS algoritmalarına ait başlangıç parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen minimum amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. Çizelge 2'den görüleceği üzere optimizasyon algoritmalarının başlangıç parametreleri optimizasyon performansını önemli oranda etkilemektedir. Bu nedenle belirlenen popülasyon/parçacık sayıları ile iterasyon sayısı sabit tutularak en düşük amaç fonksiyonu değeri veren başlangıç parametreleri geniş bir aralık taranarak elde edilmiştir. Çizelge 2 ve Çizelge 3'de PPS popülasyon veya parçacık sayısını, J_{sum} ise Eş. 8'de tanımlanan amaç fonksiyonunun minimum değerini ifade etmektedir.

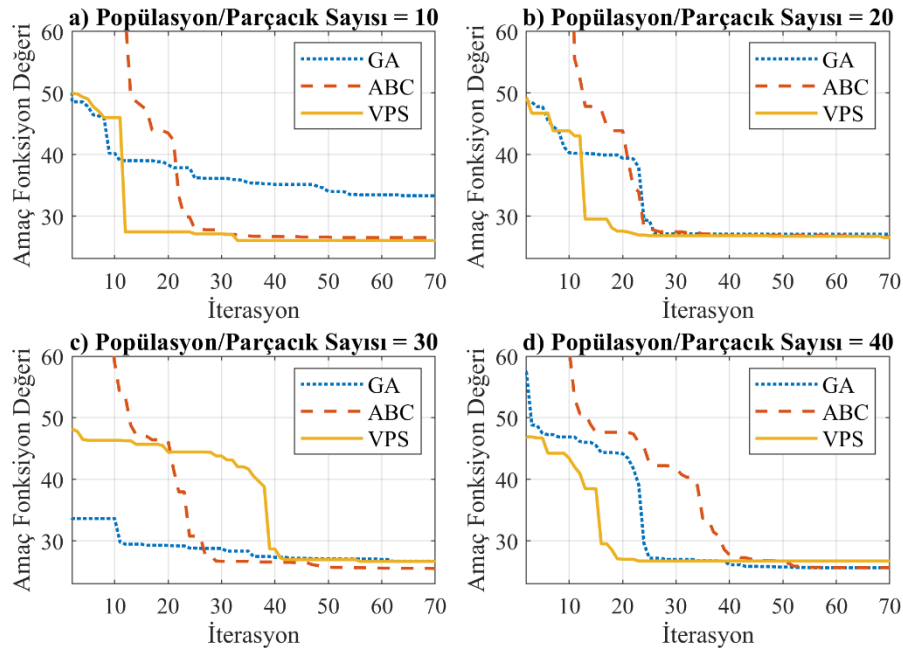
GA, ABC ve VPS algoritmaları için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen en iyi algoritma başlangıç parametreleri aşağıda sıralanmaktadır. Genetik Algoritmada (GA) için, elit (en iyi) birey sayısı ile çaprazlama fraksiyon oranı sırasıyla PPS * 0.05 ve 0.7 olarak belirlenmiştir. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmasında, modifikasyon oranı ve vazgeçme için önceden belirlenmiş tekrarlamaya sayıları sırasıyla 0.5 ve 400 olarak belirlenmiştir. Titreşimli Parçacık Sistemi (VPS) algoritmasında, titreşim sabitinin başlangıç değerleri olan ω_1 , ω_2 , ve ω_3 sırasıyla 0.3, 0.3 ve 0.4 olarak seçilmiştir. Azalan fonksiyon sabiti α ve titreşim sabitinin ρ başlangıç koşulları sırasıyla 0.05 ve 0.4 olarak belirlenmiştir. Bu algoritma parametreleri, Çizelge 2'den görüleceği üzere tasarlanan amaç fonksiyonu için geniş bir aralık taranarak belirlenen en iyi değerleridir. Çizelge 2 incelendiğinde Genetik Algoritma ile Yapay Arı Kolonisine ait başlangıç parametrelerinin doğru belirlenmediği durumlarda algoritmaların lokal minimuma takıldığı görülmektedir. VPS algoritmasının ise diğer algoritmalara nazaran lokal minimum değerlerine

takılmadığı ve özellikle düşük popülasyon sayılarında daha iyi bir performans göstererek daha düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Çizelge 2. GA algoritmasının çaprazlama fraksiyon oranı, ABC algoritmasının modifikasyon oranı ve VPS algoritmasının titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi

Table 2. Determination of the numerical values for the GA algorithm's crossover fraction rate, ABC algorithm's modification rate and, VPS algorithm's vibration constant

GA	J_{sum}	Çaprazlama Fraksiyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
PPS	10	46.782	45.153	46.439	46.584	46.453	45.094	33.013	46.310	46.279
	20	46.012	46.05	36.775	46.514	45.707	27.685	27.051	27.160	27.137
	30	45.858	46.540	45.890	29.325	26.914	25.954	25.573	25.969	25.583
	40	46.424	28.135	45.922	26.973	26.090	25.411	25.593	26.539	25.444
ABC	J_{sum}	Modifikasyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
PPS	10	45.726	45.889	44.441	27.090	26.499	26.615	26.516	26.940	29.328
	20	26.521	26.091	27.315	26.649	26.582	27.064	26.808	29.330	26.490
	30	25.511	25.472	25.530	25.617	25.502	25.497	26.139	27.705	25.539
	40	25.518	25.51	25.590	25.546	25.505	25.508	25.530	25.883	27.370
VPS	J_{sum}	Titreşim Sabitinin Başlangıç Değerleri								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
PPS	10	25.445	26.085	26.489	25.529	26.072	26.586	25.781	26.166	26.575
	20	26.205	26.730	26.860	25.871	25.728	26.402	25.795	26.079	25.887
	30	26.082	27.007	25.824	25.704	26.042	26.295	26.740	26.159	26.500
	40	25.816	26.328	26.356	25.896	25.910	26.278	26.264	26.154	26.089



Şekil 7. GA, ABC ve VPS algoritmalarının a) 10, b) 20, c) 30 ve d) 40 Popülasyon/Parçacık sayı değerleri (PPS) için yakınsama geçmişleri

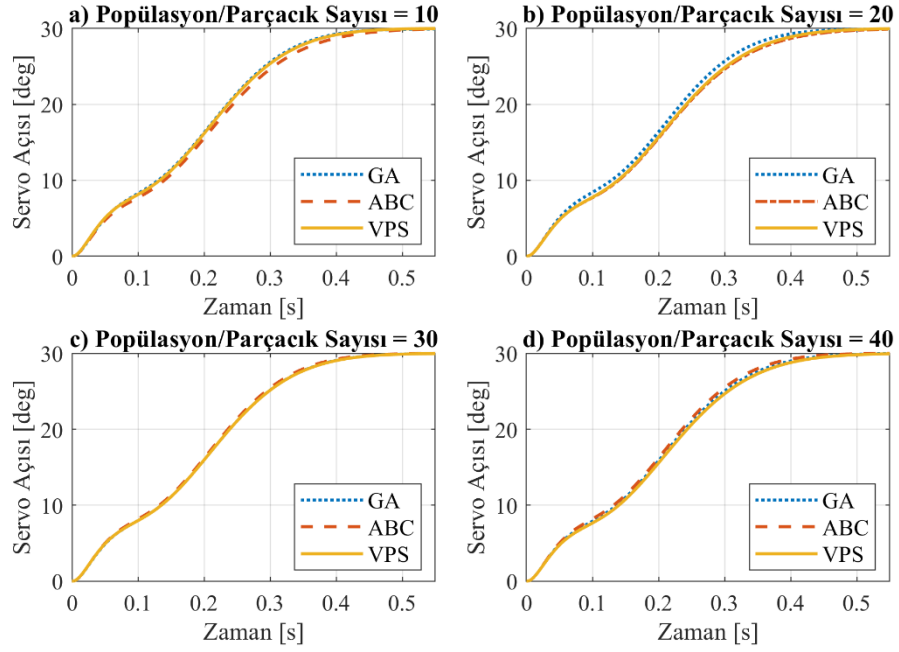
Figure 7. Convergence histories of GA, ABC, and VPS algorithms for population or particle size value a) 10, b) 20, c) 30 and, d) 40

Metasezgisel algoritmaların optimizasyon performansını belirleyen bir diğer önemli parametre ise algortmada kullanılacak olan popülasyon ya da parçacık sayısının değeridir. Düşük popülasyon ya da parçacık sayısının seçilmesi algoritmanın lokal minimuma takılmasına neden olabileceği gibi popülasyon ya da parçacık sayısının yüksek belirlenmesi de toplam hesaplama zamanının artmasına neden olacaktır. Metasezgisel algoritmaların optimizasyon performanslarının değerlendirmesinde üç kriter öne çıkmaktadır. Bu kriterler hesaplanan minimum amaç fonksiyon değeri, yakınsama geçmişi ve toplam hesaplanma süresidir. Şekil 7 GA, ABC ve VPS algoritmaları için dört farklı popülasyon ya da parçacık değerleri ile elde edilen yakınsama geçmişlerini sunmaktadır. Yakınsama geçmişlerinin daha net görülebilmesi için şekilde yatay eksen 70 iterasyon ile sınırlandırılmıştır. Şekil 7a ve Şekil 7b’de görüldüğü üzere özellikle düşük popülasyon ya da parçacık değerleri için VPS algoritması diğer algoritmalara göre hem daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamakta hem de daha düşük amaç fonksiyonu değerine ulaşmaktadır. Şekil 7c ve Şekil 7d’de görüldüğü üzere yüksek popülasyon ya da parçacık sayısının seçildiği durumlarda ise GA ve ABC algoritmaları VPS algoritmasından daha iyi sonuçlar vermektedir. GA, ABC ve VPS algoritmalarının dört farklı popülasyon/parçacık değeri için optimize edilmiş LQR ağırlık matrislerinin (Q ve R) değerleri, elde edilen minimum amaç fonksiyonlarının değerleri (J_{sum}) ve hesaplama süreleri Çizelge 3’te sunulmaktadır. Çizelge 3’ten de görüleceği üzere minimum amaç fonksiyon değerleri 10 ve 20 PPS için VPS algoritması ile 30 ve 40 PPS için ABC algoritması ile elde edilmiştir. Optimizasyon süreleri dikkate alındığında ise en hızlı sonucun VPS algoritması ile elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 3. GA, ABC ve VPS algoritmaları için optimizasyon sonuçları

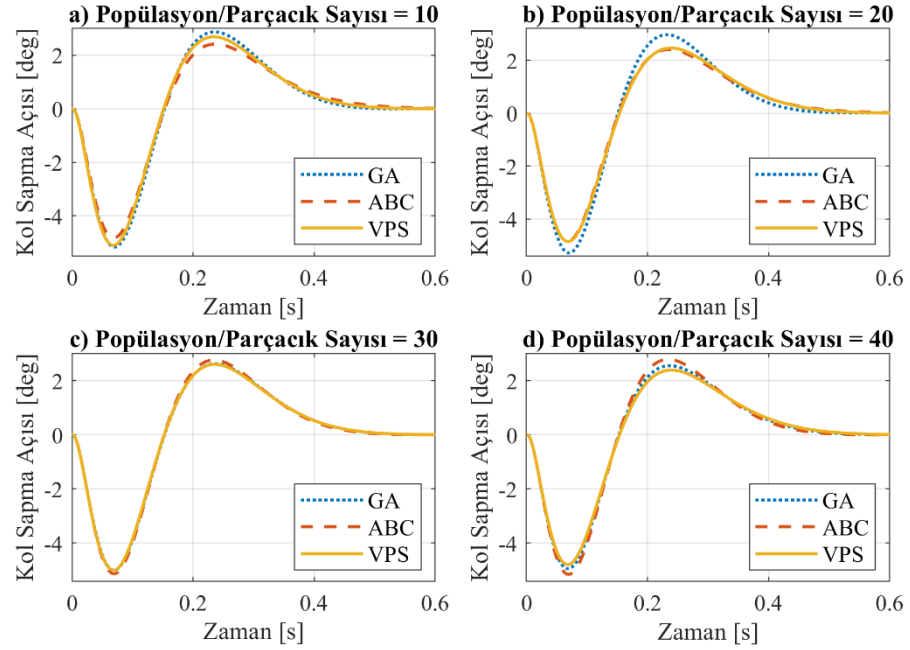
Table 3. Optimization results for GA, ABC, and VPS algorithms

		Q				R	K	J_{sum}	Süre [s]
		q_1	q_2	q_3	q_4	r_1			
PPS = 10	GA	322.1646	963.3616	0.1034	1.9890	8.9849	[5.9880 -6.7190 0.4522 0.0705]	33.013	79.866
	ABC	162.1510	891.3412	0.1612	0.8840	4.6800	[5.8863 -8.7261 0.4873 0.0806]	26.499	143.57
	VPS	212.6643	910.2563	0.2983	0.2206	4.6112	[6.3823 -8.7935 0.5323 0.1040]	25.529	73.372
PPS = 20	GA	254.3068	845.0342	0.1000	1.1838	6.9271	[6.0590 -6.5979 0.4558 0.0981]	27.051	151.25
	ABC	158.5102	989.8905	0.3395	0.6892	4.2194	[6.1292 -9.6085 0.5355 0.1022]	26.582	283.79
	VPS	144.0129	801.3284	0.2863	1.0255	4.8642	[5.9877 -8.7933 0.4939 0.0690]	25.871	145.30
PPS = 30	GA	218.9296	954.7791	0.1251	1.2731	6.0292	[6.0259 -8.0699 0.4798 0.0770]	25.573	221.87
	ABC	233.7303	918.6623	0.1000	1.2454	6.2345	[6.0972 -7.5987 0.4747 0.0859]	25.502	423.30
	VPS	157.6089	862.1389	0.1818	0.6848	4.2923	[6.1803 -8.6487 0.5092 0.0888]	25.704	216.12
PPS = 40	GA	163.2876	796.1057	0.1808	0.9194	4.3752	[6.1091 -8.6928 0.5036 0.0808]	25.593	298.23
	ABC	243.8507	939.1684	0.1000	1.2901	6.5329	[6.1094 -7.5160 0.4738 0.0874]	25.505	562.57
	VPS	225.3902	932.6787	0.1932	0.4415	5.5423	[6.0906 -9.5593 0.5233 0.0740]	25.896	293.68



Şekil 8. Esnek uzuv servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları a) 10, b) 20, c) 30 and d) 40 PPS değerleri için

Figure 8. Simulation results of flexible link manipulator servo position for a) PPS =10, b) PPS = 20, c) PPS = 30 and d) PPS =40

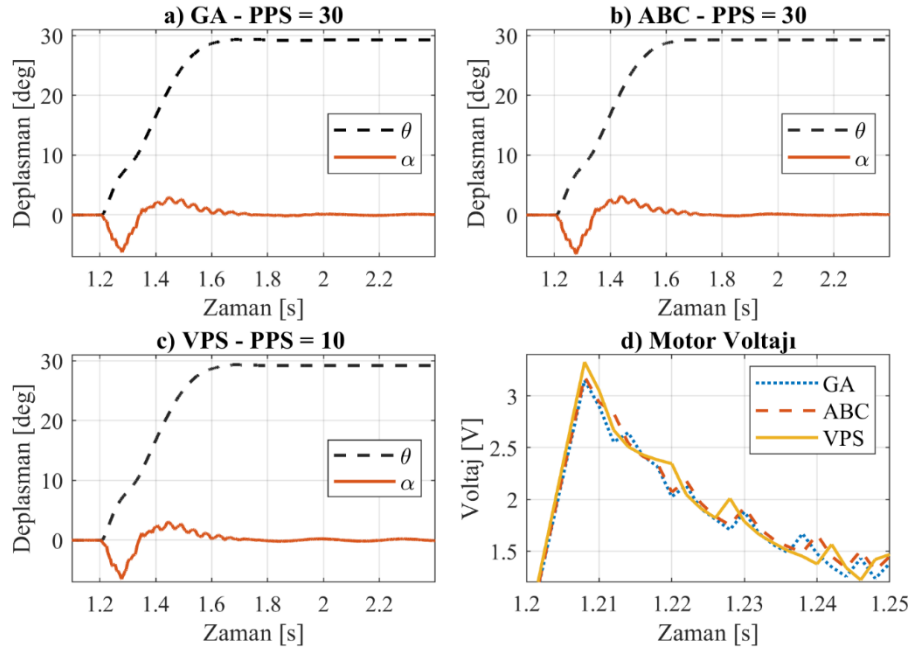


Şekil 9. GA, ABC ve VPS algoritmaları ile a) 10, b) 20, c) 30 ve d) 40 PPS değerleri için optimize edilmiş esnek robot kol uç sapmalarına ait simülasyon sonuçları

Figure 9. Simulation results of flexible link manipulator tip deflection for a) PPS =10, b) PPS = 20, c) PPS = 30 and d) PPS =40

GA, ABC ve VPS algoritmaları ile farklı PPS değerleri için ağırlık matrisleri optimize edilen LQR denetleyiciye ait teorik ve deneysel sonuçlar Şekil 8, 9 ve 10'da sunulmaktadır. Her üç algoritma ile LQR denetleyici ağırlık matrisleri optimize edilmiş ve minimum amaç fonksiyon değeri, optimizasyon süresi ve yakınsama oranları açısından algoritmalar arasında farklılıklar ortaya koyulmuştur. Önerilen amaç fonksiyonun, ERK sisteminin geçici yanıt analizinden elde edilen bir dizi parametreyi içermesi nedeniyle kontrol hedefine ilişkin daha kesin bir karara varılması ve algoritmaların performanslarının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Şekil 8 ve Şekil 9'da GA, ABC ve VPS algoritmaları için

dört farklı popülasyon değeri altında elde edilen sonuçları göstermektedir. Algoritmaların performans karşılaştırmasını yapabilmek için parçacık sayısı ile elde edilen optimal sonuçlar aynı grafikte gösterilmiştir. Şekil 8, ERK sistemi için optimize edilmiş servo konumuna ait simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 8a ve 8b’de sunulan sonuçlardan, 10 ve 20 PPS için, en hızlı servo pozisyon yanıtının GA, en yavaş servo pozisyon yanıtının ise ABC algoritması ile elde edildiği gözlenmektedir. VPS algoritmasının 10 ve 20 PPS için servo pozisyon performansı ise GA ile ABC algoritmaları arasındadır. Şekil 8c ve 8d’de gösterilen sonuçlardan, 30 ve 40 PPS için, en hızlı servo pozisyon yanıtının ABC, en yavaş servo pozisyon yanıtının ise VPS algoritması ile elde edildiği gözlenmektedir. Şekil 9, Esnek robot kol sisteminin servo hareketlerinden kaynaklanan optimize edilmiş uç sapma açılarına ait simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 9a ve 9b’de gösterilen sonuçlardan, 10 ve 20 PPS için, en düşük uç sapma genliklerinin ABC algoritması, en büyük uç sapma genliklerinin ise GA ile elde edildiği gözlenmektedir. VPS algoritmasının uç sapma performansı ise 10 ve 20 PPS için GA ile ABC algoritmaları arasındadır. Şekil 9c ve 9d’de sunulan sonuçlardan, 30 ve 40 PPS için, en düşük uç sapma genliğinin VPS algoritması, en büyük uç sapma genliğinin ise ABC algoritması ile elde edildiği görülmektedir. GA’nın 30 ve 40 PPS için uç sapma performansı ise VPS ile ABC algoritmaları arasındadır.



Şekil 10. Esnek robot kol servo açısı ve uç nokta salınımı için deneysel sonuçlar: a) En iyi GA konfigürasyonu, b) En iyi ABC konfigürasyonu, c) En iyi VPS konfigürasyonu, d) Motor Voltajı
Figure 10. Experimental results of flexible link manipulator servo angle and tip deflection for a) Best GA configuration, b) Best ABC configuration, c) Best VPS configuration and d) Motor Voltages

Optimizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen en iyi yapılandırma değerleri için ERK sisteminden elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 10’da sunulmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda her algoritma için daha önce simülasyon çalışmaları ile optimal değerleri belirlenen başlangıç parametreleri ile popülasyon/parçacık sayıları kullanılmıştır. Şekil 10 ve Çizelge 4’de θ sisteminin servo konumunu, α ise esnek kolun uç sapmasını göstermektedir. Şekil 10’da görüleceği üzere, en iyi yapılandırma değerleri için GA, ABC ve VPS algoritmaları LQR kontrolörünün ağırlık matrislerini başarıyla optimize ederek benzer kontrol sonuçları üretmektedir. Ancak çalışma kapsamında incelenen metasezgisel algoritmalar için gerekli optimizasyon süreleri, ideal popülasyon/parçacık sayıları ve hesaplanan minimum amaç fonksiyonu değerleri bakımından farklılıklar bulunmaktadır.

Çizelge 4. Optimal LQR denetleyici parametreleri için ERK sisteminden elde edilen deneysel sonuçlar**Table 4.** Experimental results of optimal LQR controller parameters for flexible link manipulator

	GA	ABC	VPS
<i>Popülasyon veya Parçacık Sayısı (PPS)</i>	30	30	10
<i>Min. Amaç Fonksiyonu (Jsum)</i>	25.573	25.502	25.529
<i>Optimizasyon Süresi [s]</i>	221.87	423.30	73.372
θ			
<i>Yükselme Zamanı (tr) [s]</i>	0.2871	0.2832	0.2841
<i>Yerleşme Zamanı (ts) [s]</i>	1.6027	1.5987	1.5967
<i>Tepe Zamanı (tp) [s]</i>	1.6800	1.7100	1.6740
<i>Aşma Değeri [deg]</i>	0.3003	0.3003	0.6024
<i>Kararlı Durum Hatası (ess) [deg]</i>	-	-	-
α			
<i>Yükselme Zamanı (tr) [s]</i>	1.2432	1.2313	0.1025
<i>Yerleşme Zamanı (ts) [s]</i>	3.0663	2.1896	2.9535
<i>Tepe Zamanı (tp) [s]</i>	1.2800	1.2780	1.2780
<i>Tepe Değeri</i>	6.2303	6.4955	6.4802

Çizelge 4, Şekil 10'da sunulan deneysel sonuçlar için kontrol yanıtının önemli parametreleri ile gerekli optimizasyon süreleri, ideal popülasyon/parçacık sayıları ve hesaplanan minimum amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. GA, ABC ve VPS algoritmaları en düşük amaç fonksiyonu değerlerine sırasıyla 30, 30 ve 10 PPS değerleri ile ulaşmaktadır. Bu durum da optimizasyon algoritmaları arasında ciddi bir hesaplama süresi farkının oluşmasına neden olmaktadır. Çizelge 4 incelendiğinde VPS algoritması için gerekli hesaplama süresinin GA ve ABC algoritmalarına göre oldukça kısa olduğu görülmektedir. Algoritmaların ulaştığı en düşük amaç fonksiyonu değerleri birbirlerine yakın olmakla birlikte en iyi performans ABC algoritması ve en kötü performans ise GA ile elde edilmiştir. ERK servo pozisyonlarına ait kontrol sonuçları incelendiğinde en hızlı servo kontrol sonucunun ABC algoritması, en yavaş servo kontrol sonucunun ise GA ile sağlandığı görülmektedir. Ayrıca, optimizasyon algoritmalarının esnek kol uç sapmaları açısından performansları karşılaştırıldığında, en düşük salınım genliğinin GA, en yüksek salınım genliğinin ise ABC ile elde edildiği görülmektedir. VPS algoritmasına ait deneysel sonuçlar incelendiğinde ise servo kontrol ve uç sapma açısına ait performans değerlerinin GA ile ABC algoritmaları arasında bulunduğu görülmektedir. VPS algoritması, özellikle düşük popülasyon veya parçacık sayılarında GA ve ABC algoritmalarından daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamakta, daha düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaşmakta ve daha az hesaplama süresi gerektirmektedir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, bir esnek robot kol sisteminin hareket ve titreşim kontrolüne yönelik LQR ağırlık matrislerinin optimizasyonunda GA, ABC ve VPS algoritmalarının tasarım ve performans analizlerini detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen optimizasyonun temel amacı esnek robot kol sisteminin istenilen açısal konuma en hızlı şekilde ulaşması sağlamaktır. Titreşimli Parçacık Sistemi (VPS) algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR ağırlık matrislerinin ayarlanmasında kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliği, Genetik Algoritma ve Yapay Arı Kolonisi gibi iyi bilinen optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir amaç fonksiyonu da önerilmektedir. GA, ABC ve VPS algoritmalarına ait başlangıç parametreleri geniş bir arama uzayı taranarak belirlenmiş olup her algoritma dört farklı popülasyon değeri altında incelenerek 100 iterasyon için sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon algoritmaları ile elde edilen en iyi kontrol sonuçları esnek robot kol sistemine uygulanarak teorik ve deneysel karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- VPS algoritması, özellikle düşük popülasyon veya parçacık sayılarında, GA ve ABC algoritmalarına göre daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamaktadır.
- Popülasyon büyüklükleri ile iterasyon sayıları sabit tutularak optimizasyon süreleri dikkate alındığında, en hızlı algoritmanın VPS, en yavaş algoritmanın ise ABC olduğu görülmektedir.
- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan, VPS algoritması ile düşük popülasyon veya parçacık sayılarında (10-20 PPS) en düşük amaç fonksiyonu değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan, ABC algoritması ile yüksek popülasyon veya parçacık sayılarında (30-40 PPS) en düşük amaç fonksiyonu değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir.

VPS tabanlı LQR kontrolörünün ERK sistemine ait maksimum aşma, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı gibi performans ölçütleri dikkate alındığında GA ve ABC algoritmaları ile oluşturulan kontrolcülerden daha başarılı bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Çalışma kapsamında önerilen amaç fonksiyonu ve VPS algoritması ile LQR denetleyici ağırlık matrisleri optimize edilerek ERK sisteminin istenilen açılal konuma en hızlı şekilde ulaşılması sağlanmış ve bu hareket sonucunda sistemde meydana gelen artık titreşimler ortadan kaldırılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)


- Abdel-razak, M. H., Ata, A. A., Mohamed, K. T., Haraz, E. H., 2020, "Proportional-integral-derivative controller with inlet derivative filter fine-tuning of a double-pendulum gantry crane system by a multi-objective genetic algorithm.", *Engineering Optimization*, Vol. 52, No. 3, pp. 527-548.
- Basturk, B., 2006, "An artificial bee colony (ABC) algorithm for numeric function optimization", *In IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Vol. 39, No. 3, pp. 459-471.
- Bilgiç, H. H., Sen, M. A., Kalyoncu, M., 2016, "Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm", *Journal of Vibroengineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 3684-3694.
- Bilgiç, H. H., Sen, M. A., Yapıcı, A., Yavuz, H., Kalyoncu, M., 2021, "Meta-Heuristic Tuning of the LQR Weighting Matrices Using Various Objective Functions on an Experimental Flexible Arm Under the Effects of Disturbance." *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-14.
- Bilgiç, H. H., Conker C, Yavuz H., 2021, "Fuzzy logic-based decision support system for selection of optimum input shaping techniques in point-to-point motion systems", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 235(6), 795-808.
- Bilgiç, H. H., Tutumlu, M. S., Conker, Ç., 2021, "Top ve çubuk sistemi için kaskad denetleyici parametrelerinin meta-sezgisel algoritmalarla optimizasyonu." *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Vol. 23, No. 67, pp. 157-167.
- Bingul, Z., Karahan, O., 2018, "Comparison of PID and FOPID controllers tuned by PSO and ABC algorithms for unstable and integrating systems with time delay", *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 39, No. 4, pp. 1431-1450.
- Cao, Q. S., Zhou, J. H., Li, L., Ye, L., 2010, "Vibration control of piezoelectric flexible manipulator based on fuzzy self-tuning PID algorithm", *Journal of Vibration and Shock*, Vol. 29, No. 12, pp. 181-186.
- Conker, Ç., Kilic, A., Mistikoglu, S., Kapucu, S., Yavuz, H., 2014, "An enhanced control technique for the elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators", *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 60(9), 592-599.
- Çınaroğlu, S., Bulut, H., 2018, "K-ortalamlar ve parçacık sürü optimizasyonu tabanlı kümeleme algoritmaları için yeni ilklendirme yaklaşımları", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, Vol. 33, No. 2, pp. 413 - 424.

- Dağdeviren, U., Kaymak, B., 2018, "Yapay arı koloni algoritması kullanılarak betonarme istinat duvarlarının optimum maliyet tasarımını etkileyen parametrelerin incelenmesi", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, Vol. 33, No. 1, pp. 239-253.
- Fahmy, A. A., Kalyoncu, M., Castellani, M., 2012, "Automatic design of control systems for robot manipulators using the bees algorithm", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 226, No. 4, pp. 497-508.
- Fathi, H., Vaez, S. H., Zhang, Q., Alavi, A. H., 2021, "A new approach for crack detection in plate structures using an integrated extended finite element and enhanced vibrating particles system optimization methods", *In Structures*, Elsevier, Vol. 29, pp. 638-651.
- He, W., Zhang, S., Ge, S. S., 2012, "Boundary output-feedback stabilization of a Timoshenko beam using disturbance observer", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 11, pp. 5186-5194.
- Huang, J. W., Lin, J. S., 2008, "Backstepping control design of a single-link flexible robotic manipulator", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 41, No. 2, pp.11775-11780.
- Jacknoon, A., Abido, M. A., 2017, "Ant Colony based LQR and PID tuned parameters for controlling Inverted Pendulum", *2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering*, IEEE, 1-8.
- Jans, R., Degraeve, Z., 2007, "Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches", *European journal of operational research*, 177(3), 1855-1875.
- Jnifene, A., 2007, "Active vibration control of flexible structures using delayed position feedback", *Systems & control letters*, Vol. 56 No. 3, pp. 215-222.
- Karaboğa, D., 2017, "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları", Nobel Akademi Yayıncılık.
- Kaveh, A., Ghazaan, M. I., 2017, "A new meta-heuristic algorithm: vibrating particles system, *Scientia Iranica*", *Transaction A: Civil Engineering*, Vol. 24 No. 2, pp. 551.
- Kaveh, A., Rahmani, P., Eslamlou, A. D., 2021, "A Multistage Damage Detection Approach Using Graph Theory and Water Strider Algorithm", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-22.
- Lahdhiri, T., Elmaraghy, H. A., 1999, "Design of an optimal feedback linearizing-based controller for an experimental flexible-joint robot manipulator", *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 20 No. 4, pp. 165-182.
- Mansour, T., Konno, A., Uchiyama, M., 2008, "Modified PID control of a single-link flexible robot.", *Advanced Robotics*, Vol. 22 No. 4, pp. 433-449.
- Mirshekaran, M., Piltan, F., Esmaili, Z., Khajepour, T., Kazeminasab, M., 2013, "Design sliding mode modified fuzzy linear controller with application to flexible robot manipulator", *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 5(10), 53.
- Oliveira, M., 2005, "Modern heuristics review for PID control optimization: a teaching experiment", *In 2005 international conference on control and automation*. IEEE, Vol. 2, pp. 828-833
- ÖNEN, Ü., Cakan, A., İlhan, I., 2019, "Performance comparison of optimization algorithms in LQR controller design for a nonlinear system", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 27 No. 3, pp. 1938-1953.
- Pieper, J. K., 1998, "Optimal control of a flexible manipulator and controller order reduction", *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 19 No. 5, pp. 331-343.
- Quanser Inc., 2011, Rotary Flexible Link Module Datasheets, www.quanser.com
- Sen, M. A., Kalyoncu, M., 2016, "Optimal tuning of a LQR controller for an inverted pendulum using the bees algorithm", *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 4 No.5, pp. 384-387.
- Sen, M. A., Kalyoncu, M., 2020, "Grey Wolf Optimizer Based Tuning of a Hybrid LQR-PID Controller for Foot Trajectory Control of a Quadruped Robot", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, Vol. 32 No. 2, pp. 674-684.
- Siddique, M. N. H., Tokhi, M. O., 2002, "GA-based neuro-fuzzy controller for flexible-link manipulator", *In Proceedings of the International Conference on Control Applications*, IEEE, 1, 471-476.

- Sooraksa, P., Chen, G., 1998, "Mathematical modeling and fuzzy control of a flexible-link robot arm", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 27 No. 6, pp. 73-93.
- Talebi, H. A., Khorasani, K., Patel, R. V., 1998, "Neural network based control schemes for flexible-link manipulators: simulations and experiments", *Neural networks*, Vol. 11 No. 7-8, pp. 1357-1377.
- Tinkir, M., Önen, Ü., Kalyoncu, M., 2010, "Modelling of neurofuzzy control of a flexible link", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 224 No. 5, pp. 529-543.
- Wilson, D. G., Robinett, R. D., Parker, G. G., Starr, G. P., 2002, "Augmented sliding mode control for flexible link manipulators", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 34, No.4, pp. 415-430.
- Wongsathan, C., Sirima, C., 2009, "Application of GA to design LQR controller for an inverted pendulum system", *In 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, IEEE, 951-954.



MAKSİMUM YÜKSELTİCİ KONTROLLÜ T-KAYNAK İNVERTERİN ANALİZİ

Mustafa Sacid ENDİZ 

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE
mSENDIZ@ERBAKAN.EDU.TR

(Geliş/Received: 12.07.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.08.2021)

ÖZET: Geleneksel akım ve gerilim kaynaklı inverterler, DC-AC güç dönüşümünde girişine uygulanan gerilimi yükseltmek için DC-DC dönüştürücü veya trafoya ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyacı ortadan kaldırmak amacıyla son yıllarda sıklıkla kullanılan empedans kaynaklı inverter (ZSI) devresi önerilmiştir. ZSI devresi, sahip olduğu empedans katı ve kısa devre çalışabilme özelliği sayesinde DC giriş gerilim değerini istenilen değere dönüştürebilmektedir. Bu çalışmada, ZSI'nin dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha verimli DC-AC güç dönüşümü yapabilen T-Kaynak inverter (TSI) devresi, Matlab/Simulink ortamında farklı devre parametreleri için incelenmiştir. TSI devresinin yapısı ve çalışma prensibi, ilgili denklemler kullanılarak teorik olarak açıklanmıştır. TSI devre yapısı, ZSI'de olduğu gibi aynı faz kolundaki anahtarlama elemanlarını kısa devre ederek DC giriş gerilimini yükseltme özelliğine sahiptir. Kullanılan modülasyon indeksine ve kısa devre görev oranına bağlı olarak, TSI devresi düşürücü-yükseltici olarak çalışabilmektedir. Güç katındaki anahtarlama elemanlarını sürmek için sinüzoidal PWM tabanlı maksimum yükseltici kontrol tekniği uygulanmıştır. TSI'nin belirli bir kısa devre çalışma oranında ve DC giriş gerilim değerinde; DC hat gerilimi, kondansatör ve AC çıkış gerilim değeri, ZSI devresi ile karşılaştırmalı olarak hesaplanmıştır. Benzetim çalışmaları ile teorik sonuçların örtüştüğü görülmüş, TSI devresinin ZSI'ye kıyasla daha az pasif devre elemanı kullanarak etkin şekilde DC-AC güç dönüşümü yapabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: T-Kaynak İnverter, Maksimum Yükseltici Kontrol, Yükseltme faktörü, ZSI

Analysis of T-Source Inverter with Maximum Boost Control

ABSTRACT: Conventional current and voltage source inverters need a DC-DC converter or transformer to increase the applied voltage in DC-AC conversion. In order to eliminate this need, Z-Source inverter (ZSI), which has been used frequently in recent years, has been proposed. The ZSI circuit can convert DC input voltage to the desired value using its Z-Network and short-circuit capability. In this study, T-Source inverter (TSI), which can make more efficient DC-AC conversion by eliminating the disadvantages of ZSI, is examined using Matlab/Simulink for different circuit parameters. The working principle of TSI circuit is explained theoretically by using related equations. TSI network is able to increase DC voltage by short-circuiting the switching elements in the same phase leg as in ZSI. Depending on the applied modulation index and shoot-through duty ratio, TSI can operate as a buck-boost converter. PWM based maximum boost control technique is employed to drive the switching elements. Compared to ZSI; DC-link voltage, capacitor and AC output voltage of TSI are calculated at a certain shoot-through duty ratio and DC input voltage. It has been shown that the theoretical results match with the simulation studies, and TSI circuit can effectively perform DC-AC conversion using less passive circuit elements compared to ZSI.

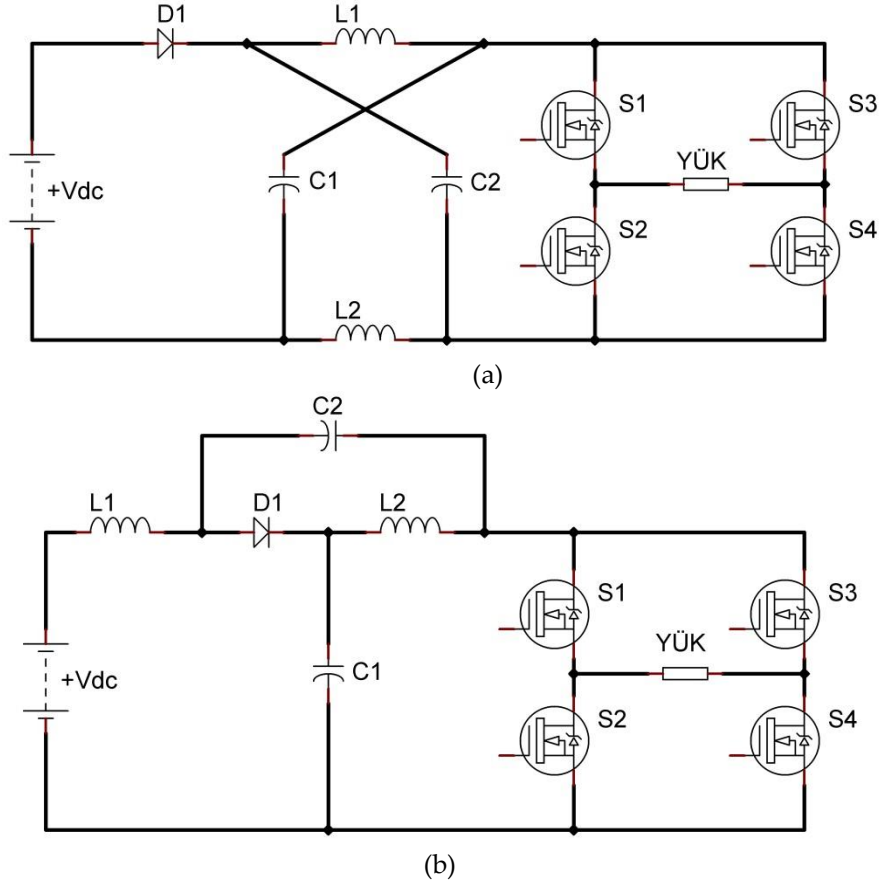
Key Words: T-Source Inverter, Maximum Boost Control, Boost factor, ZSI

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda fosil yakıtların hızla tükenmesine bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının önem kazanmasıyla birlikte, DC-AC dönüştürücüler oldukça popüler hale gelmiştir (Liu, 2020). Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen enerjinin günlük hayatta kullanılabilmesi için, düşük maliyetle ve etkin şekilde DC-AC güç dönüşümünün yapılabilmesi gerekmektedir (Ebrahimi ve diğ., 2020; Endiz ve diğ., 2020).

Endüstride yaygın olarak kullanılan gerilim kaynaklı inverterler (VSI) düşürücü yapıda olmalarından, uygulanan gerilim değerini yükseltmek için DC-DC dönüştürücü veya trafoya ihtiyaç duymaktadırlar (Chen ve Smedley, 2008; Estévez-Bén ve diğ., 2020).

Geleneksel VSI'de; kullanılan trafonun büyük boyutlu oluşu, DC-DC dönüştürücü yapısındaki MOSFET anahtarın ve sürücü devresinin ek maliyet oluşturması ile DC-AC güç dönüşümünün iki aşamalı oluşu, yeni çözüm arayışlarını doğurmuştur. Geleneksel VSI devrelerinin dezavantajlarının üstesinden gelmek amacıyla Şekil 1'de devre şemaları sırasıyla verilen empedans kaynaklı inverter (ZSI) ve yarı empedans kaynaklı inverter (qZSI) topolojileri önerilmiştir (Peng, 2003; Mande ve diğ., 2020).



Şekil 1. (a) ZSI devre şeması (b) qZSI devre şeması

Figure 1. (a) ZSI circuit (b) qZSI circuit

Empedans katında kullanılan iki eşdeğer büyüklüğe sahip bobin ve kondansatör ile inverter katında bulunan anahtarlama elemanları kısa devre edilebilmektedir. Bu sayede ZSI devresi geleneksel VSI'ye kıyasla, büyük boyutlu trafo ve DC-DC dönüştürücüye ihtiyaç duymadan tek aşamada hem düşürücü hem de yükseltici olarak çalışabilmektedir (Ellabban ve Abu-Rub, 2016; Tang ve diğ., 2010). Ayrıca inverterin

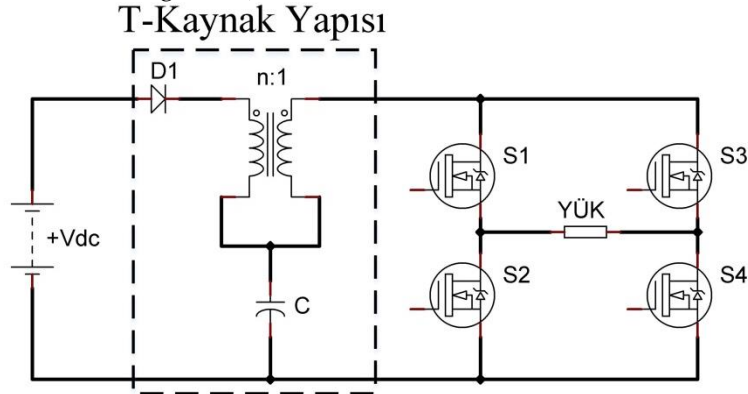
aynı faz kolundaki anahtarların eş zamanlı olarak iletme girebilmesi, devreyi elektromanyetik girişim (EMI) gibi istenmeyen durumlara karşı daha güvenli ve esnek hale getirmektedir (Li ve diğ., 2012).

Bunula birlikte ZSI devresi bazı dezavantajlara sahiptir. Galvanik izolasyon ve empedans katındaki kondansatörlerin parazit endüktans etkisi, anahtarlama yapılırken MOSFET'ler üzerinde aşırı gerilim yükselmesine neden olabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla ilave sönümleyici devre yapıları kullanılmakta veya daha büyük gerilimlere dayanabilen yüksek maliyetli MOSFET'ler tercih edilmektedir. ZSI'nin bir diğer dezavantajı, DC katı ile inverter güç katının farklı toprak referanslarına sahip olmasıdır. Bu durum EMI'ye karşı devreyi daha hassas yapmaktadır (Dong ve diğ., 2016). ZSI'de bahsedilen teorik kısıtlamaları ortadan kaldırmak ve devre parametrelerini iyileştirmek amacıyla birçok devre yapısı geliştirilmiştir (Li ve diğ., 2009; Zhu ve diğ., 2010; Nguyen ve diğ., 2011).

Bu çalışmada, geleneksel VSI ve ZSI/qZSI devre yapılarının sahip olduğu dezavantajları ortadan kaldıran T-Kaynak inverter (TSI) devresinin çalışma performansı farklı devre parametreleri için analiz edilmiştir. DC hat gerilimi, kondansatör ve AC çıkış gerilim değeri belirli bir kısa devre çalışma oranında ve DC giriş gerilim değerinde Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılarak ZSI devresi ile karşılaştırmalı olarak hesaplanmıştır.

T-KAYNAK İNVERTER DEVRE YAPISI (T-SOURCE INVERTER CIRCUIT STRUCTURE)

Şekil 2'de tek fazlı TSI devresinin genel görünümü verilmiştir. TSI devresinde DC katı ile anahtarlama elemanlarının olduğu güç katı aynı ortak referansa sahiptir. TSI devresi ZSI'den farklı olarak, empedans katında T şeklinde bağlantılı yüksek frekanslı ve düşük kaçak akıllı trafo ile bir kondansatörden oluşmaktadır. Girişte kullanılan diyot, güç katından kaynağa doğru akabilecek ters yönlü akımlara karşı koruma sağlamaktadır. TSI devre şemasında görüldüğü üzere, ZSI/qZSI devrelerinde empedans katında iki bobin ve iki kondansatör kullanılırken TSI devresinde daha az sayıda pasif devre elemanı kullanılmaktadır (Sivaraman ve Prem, 2017; Liu ve diğ., 2020).



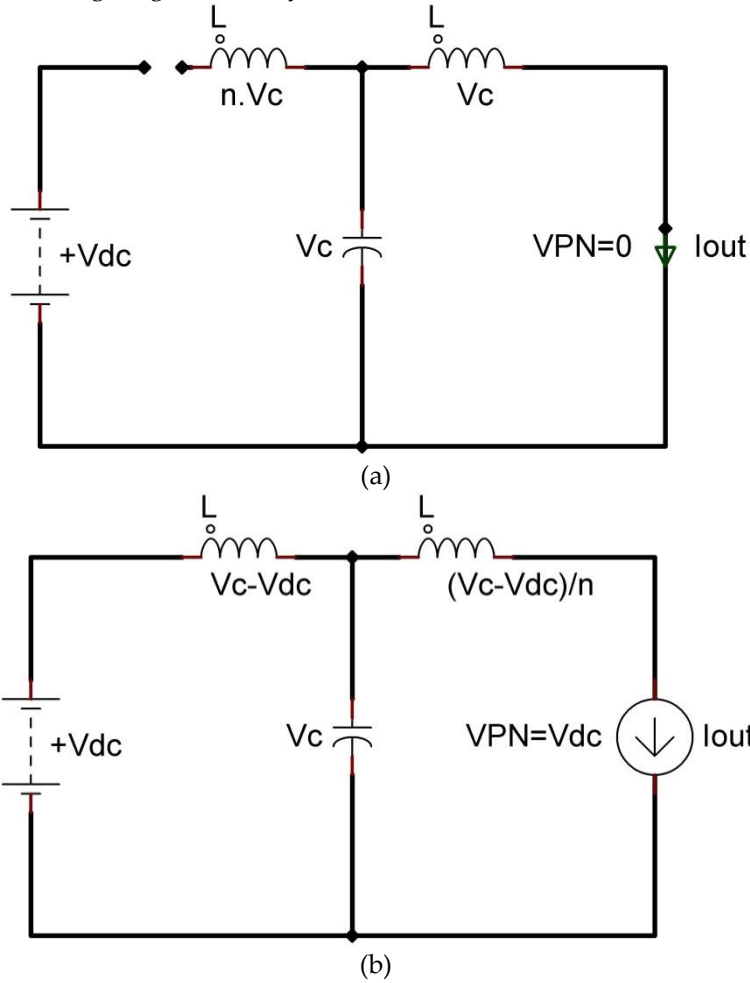
Şekil 2. Tek fazlı TSI devre şeması

Figure 2. Single-phase TSI main circuit

Geleneksel ZSI/qZSI devrelerindeki gibi TSI devresi Şekil 3'te gösterildiği şekilde kısa devre ve kısa devre olmayan çalışma modlarına sahiptir. Şekil 3.a'da gösterilen kısa devre çalışma modunda aynı faz kolundaki anahtarlama elemanları eş zamanlı olarak iletme sokulur ve trafo sargıları enerjilenir. Giriş diyotu ters kutuplu olmasından dolayı kesimde, DC hat gerilimi ise kısa devre durumundan dolayı sıfır volta eşittir. ZSI/qZSI devrelerinde yükseltme işleminin yapıldığı LC devresi yerine kullanılan T-Kaynak yapısı ile kısa devre anahtarlama yapılarak çıkış gerilim seviyesi yükseltilir. Anahtarlama elemanlarını sürmek amacıyla ZSI'de kullanılan geleneksel PWM tabanlı tüm kontrol teknikleri TSI'de uygulanabilir (Liu ve diğ., 2018).

T-Kaynak yapısındaki trafonun sarım oranı n , birden büyük seçildiğinde çıkış gerilim seviyesinde artış olacaktır başka bir ifade ile ZSI/qZSI devrelerindeki kazançla aynı kazancı elde etmek için daha küçük kısa devre çalışma oranı yeterli olacaktır. Kısa devre çalışma oranının küçülmesi daha büyük modülasyon indeksinin kullanılmasını mümkün kılacak bu da hem DC bara kullanım oranının hem de çıkış sinyal kalitesinin artmasını sağlayacaktır.

Şekil 3.b'de verilen kısa devre olmayan çalışma modunda giriş diyotu doğru kutuplu olacağından iletimde, DC hat gerilimi ise kullanılan kısa devre çalışma oranına bağlı olarak yükseltilmiş durumdadır. Kısa devre anında enerjilenmiş durumda olan trafo sargıları, kısa devre olmayan çalışma durumunda yükü beslemektedir. Bu şekilde DC giriş gerilim seviyesi arttırılmaktadır.



Şekil 3. (a) TSI devresi kısa devre çalışma modu b) TSI devresi kısa devre olmayan çalışma modu

Figure 3. (a) TSI circuit in shoot-through mode (b) TSI circuit in non-shoot-through mode

T_0 ve T_1 , anahtarlama periyodu süresince kısa devre çalışma süresi ve kısa devre olmayan çalışma süresi olmak üzere, kısa devre görev oranı D ifadesi T_0 'ın T_1 'e oranına eşittir. Sürekli durum analizinde trafo sargıları üzerindeki ortalama gerilim değeri V_{L1} ve V_{L2} sıfır volta eşit olacaktır. TSI devresinde; V_{dc} kaynak gerilimini, V_c kondansatör gerilimini, V_{PN} DC hat gerilimini, M modülasyon indeksini ve B yükseltme faktörünü göstermek üzere ilgili devre parametreleri alttaki eşitliklerde belirtilmiştir.

$$\frac{V_c}{(V_{dc})} = \frac{T_1}{(T_1 - n * T_0)} = \frac{1 - D}{(1 - (n + 1) * D)} \quad (1)$$

Kısa devre görev oranı $D < 1/(n+1)$ şartı geçerli olmak üzere, D büyüklüğü trafo sarım oranı n büyüklüğüne göre belirlenir. Verilen eşitlikte $n > 1$ olmak üzere D 'nin alabileceği en büyük değer $ZSI/qZSI$ devrelerine göre aynı yükseltme faktörünü elde etmek amacıyla daha düşük olacaktır. Başka bir ifade ile aynı büyüklükteki D için TSI devresi daha büyük B değerine sahip olacaktır.

Eşitlik (1) kullanılarak kısa devre olmayan çalışma modunda V_{PN} DC hat gerilimi, Eşitlik (2)'de verilmiştir. Kısa devre olmayan çalışma modunda yükseltile DC giriş gerilimi inverterin güç katında anahtarlama elemanları tarafından AC gerilime dönüştürülür. Tek fazlı inverterde kazanç G ve AC çıkış gerilim değeri V_{ac} Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanır.

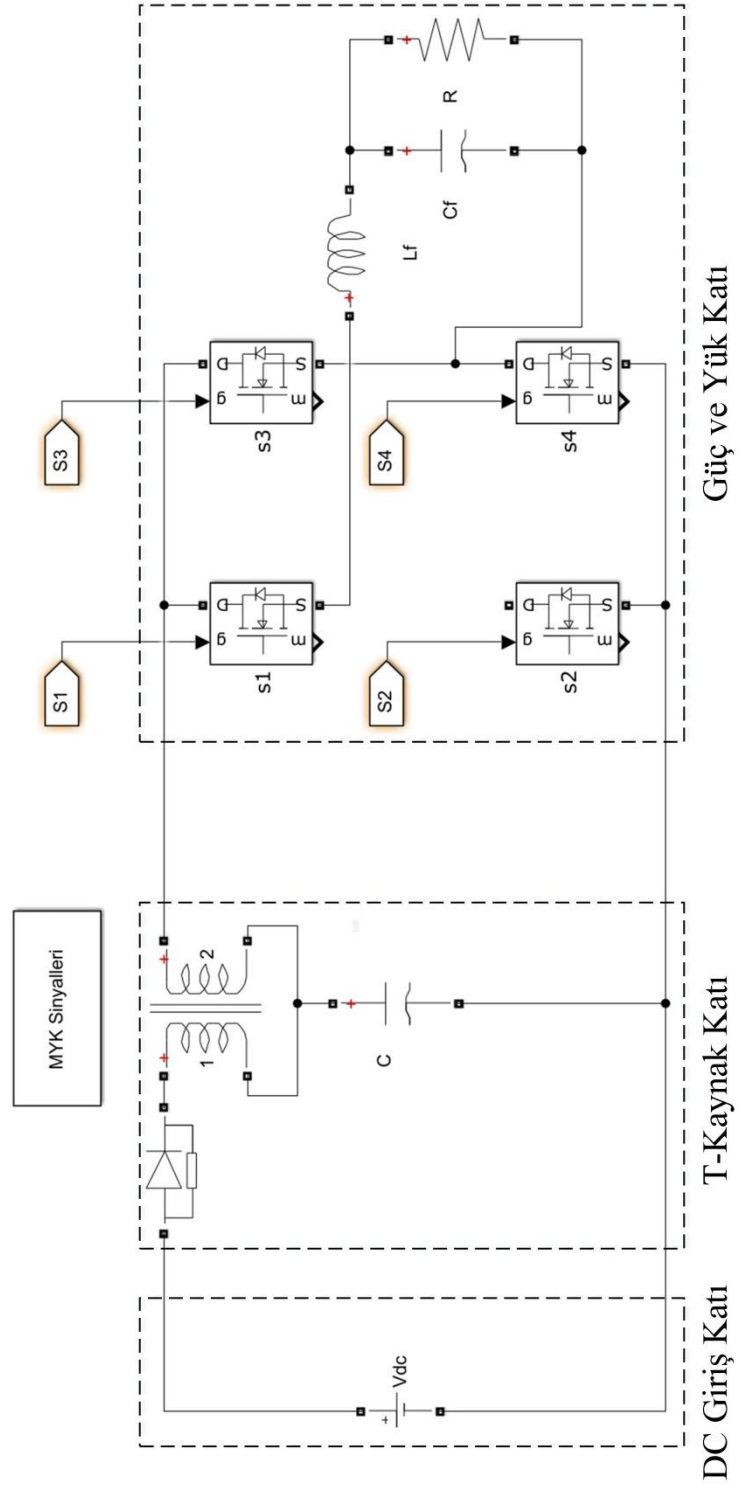
$$V_{PN} = \frac{(V_C - V_{dc})}{n} + V_C \quad (2)$$

$$G = M * B \text{ ve } V_{ac} = M * V_{PN} = M * \left(\frac{(V_C - V_{dc})}{n} + V_C \right) \quad (3)$$

BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATION RESULTS)

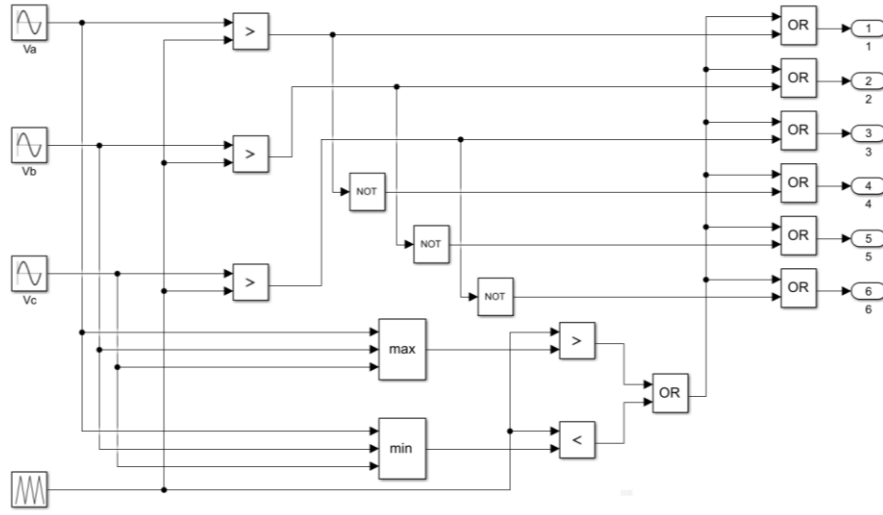
Benzetim çalışmaları, tek fazlı TSI devresinde ideal trafo için trafo sarım oranı 1:1 ve 2:1 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları, Şekil 4'te gösterilen ve Matlab/Simulink ortamında oluşturulan devre üzerinde yapılmıştır. Devre parametreleri sırasıyla; $V_{dc}=120V$, $D=0,2$, anahtarlama frekansı $f_s=10kHz$, $L_1=L_2=100\mu H$, $C=470\mu F$, çıkış filtre elemanları $L_F=1mH$, $C_F=10\mu F$ ve yük $R_L=10\Omega$ olarak seçilmiştir.

İnverter güç katındaki anahtarlama elemanlarını sürmek amacıyla maksimum yükseltici kontrol tekniği kullanılmıştır. Şekil 5'te maksimum yükseltici kontrol tekniği için kontrol blok diyagramı ve dalga şekilleri gösterilmiştir. Faz farkına sahip üç referans sinyali (V_a, V_b, V_c) ve bir üçgen taşıyıcı dalga sinyali (V_t) karşılaştırılarak, anahtarlama elemanları için gerekli tetikleme sinyalleri üretilmektedir. Taşıyıcı dalga genliğinin referans sinyallerin genliğinden büyük olduğu durumlarda anahtarlar kısa devre modunda, kalan durumlarda anahtarlar taşıyıcı tabanlı PWM modunda sürülmektedir. Bu teknikte D , B ve G ifadeleri Eşitlik (4) ve Eşitlik (5)'te verilmiştir.

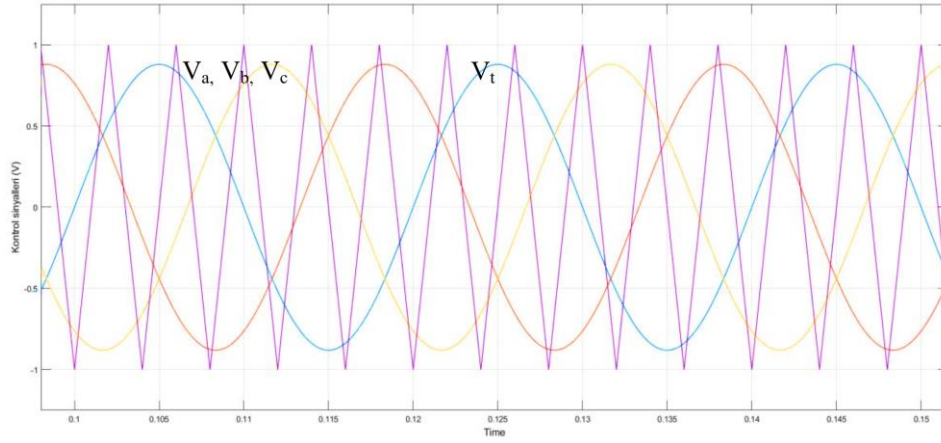


Şekil 4. Benzetim çalışmalarında tasarlanan TSI devre modeli

Figure 4. (a) Simulation model of TSI circuit



(a)



(b)

Şekil 5. Maksimum yükseltici kontrol tekniği (a) Blok diyagramı (b) Dalga şekilleri

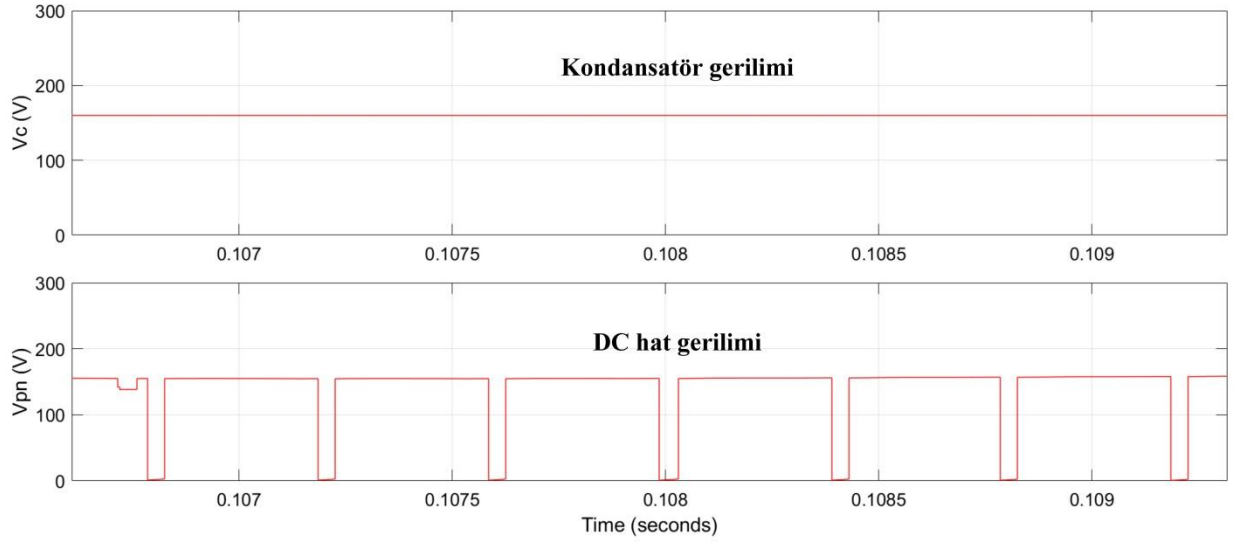
Figure 5. Maximum boost control technique (a) Block diagram (b) Waveforms

$$D = \frac{2\pi - 3\sqrt{3}M}{2\pi} \quad (4)$$

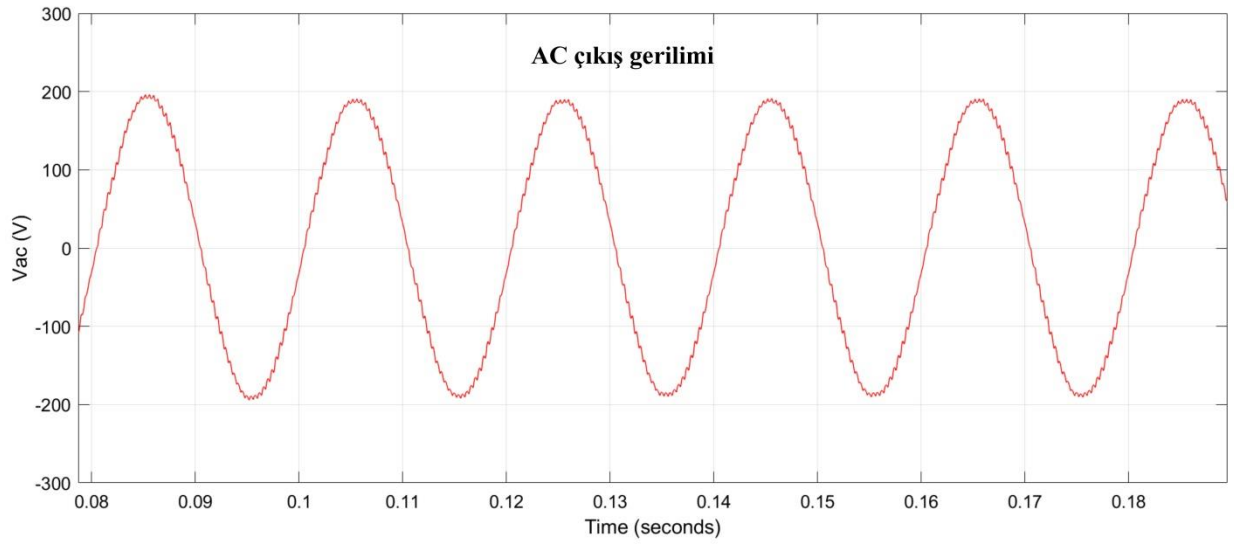
$$B = \frac{\pi}{3\sqrt{3}M - \pi} \text{ ve } G = \frac{\pi(B + 1)}{3\sqrt{3}} \quad (5)$$

Benzetim çalışmalarında T-Kaynak inverter devresinde trafo sarım oranı 1:1 ve 2:1 değerleri için elde edilen DC hat gerilimi V_{PN} , kondansatör V_C ve AC çıkış gerilim değeri V_{ac} , ZSI devresi ile karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir.

Maksimum yükseltici kontrol tekniğinde $D=0,2$ için modülasyon indeksi Eşitlik (4) kullanılarak $M=0,96$ bulunur. ZSI'de $D=0,2$ için $V_C=160V$, $V_{PN}=200V$ ve $V_{ac}=192V$ olarak hesaplanmıştır. TSI'de trafo sarım oranı 1:1 için $V_C=160V$, $V_{PN}=200V$ ve $V_{ac}=192V$ olurken, sarım oranı 2:1 yapıldığında $V_C=240V$, $V_{PN}=300V$ ve $V_{ac}=288V$ olarak bulunmuştur. ZSI için yükseltme faktörü ve kazanç sırasıyla $B=1,66$ ve $G=1,6$ hesaplanmıştır. TSI'de ise ilk durumda $B_{1:1}=1,66$ ve $G_{1:1}=1,6$ olurken, ikinci durumda sarım oranının artmasına bağlı olarak $B_{2:1}=2,5$ ve $G_{2:1}=2,4$ bulunmuştur.

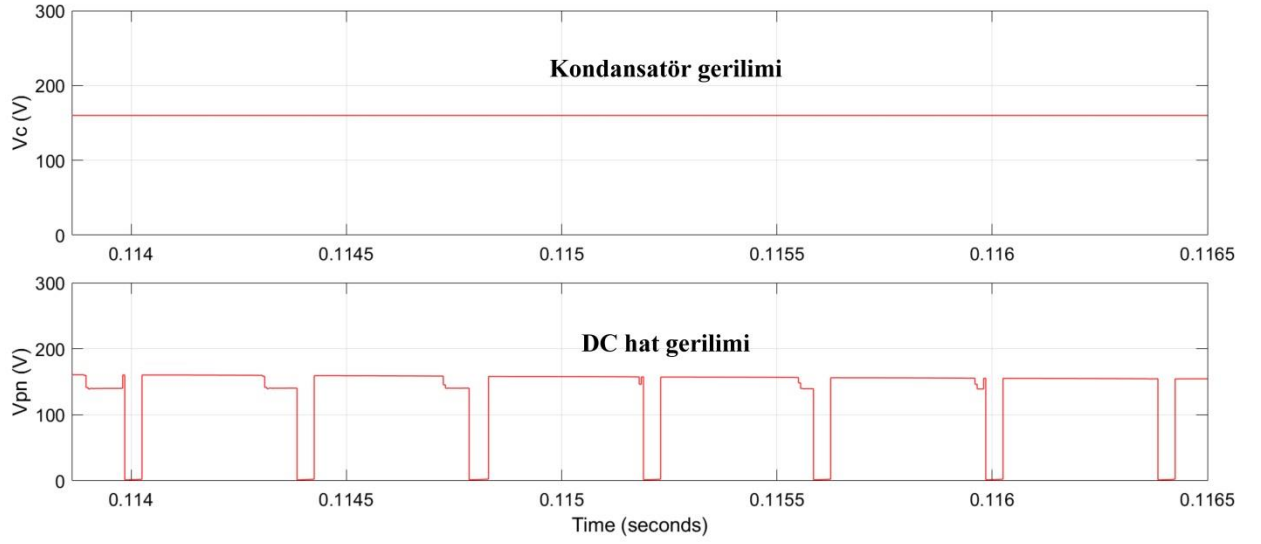


(a)

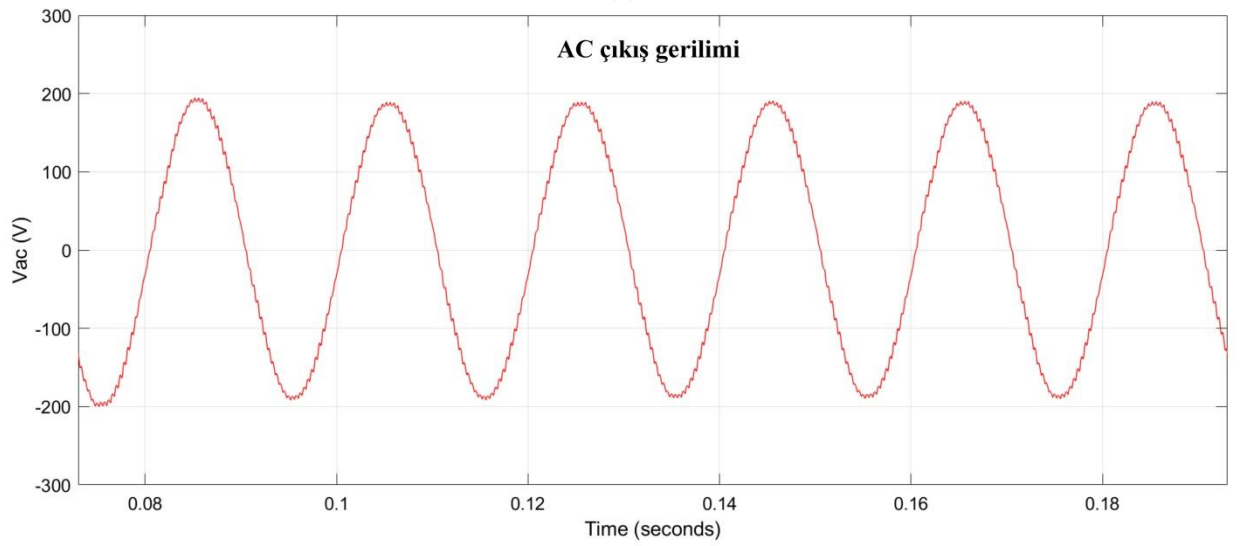


(b)

Şekil 6. ZSI için (a) $V_{PN}-V_C$ (b) V_{ac}
Figure 6. Simulation results for ZSI (a) $V_{PN}-V_C$ (b) V_{ac}

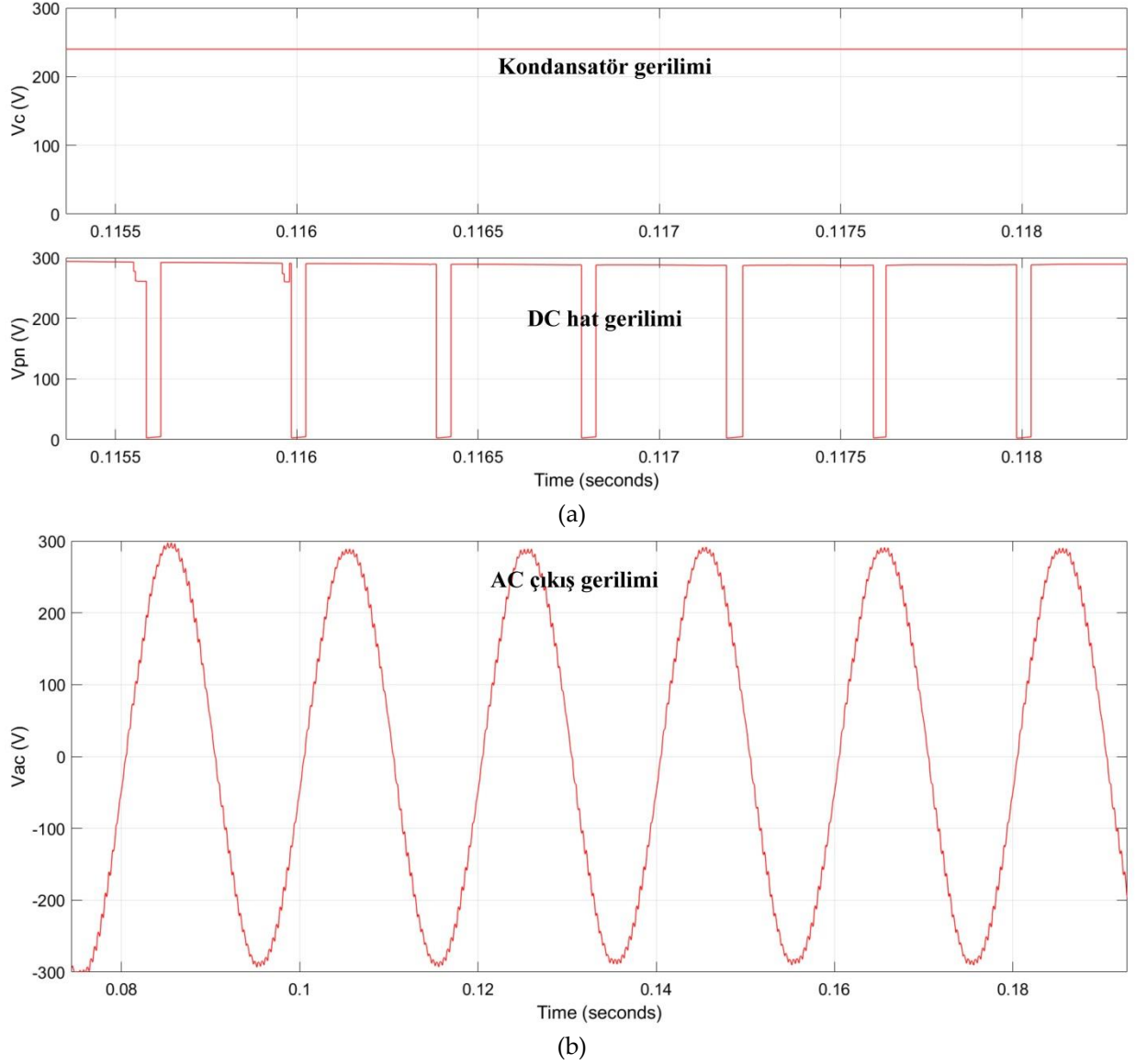


(a)



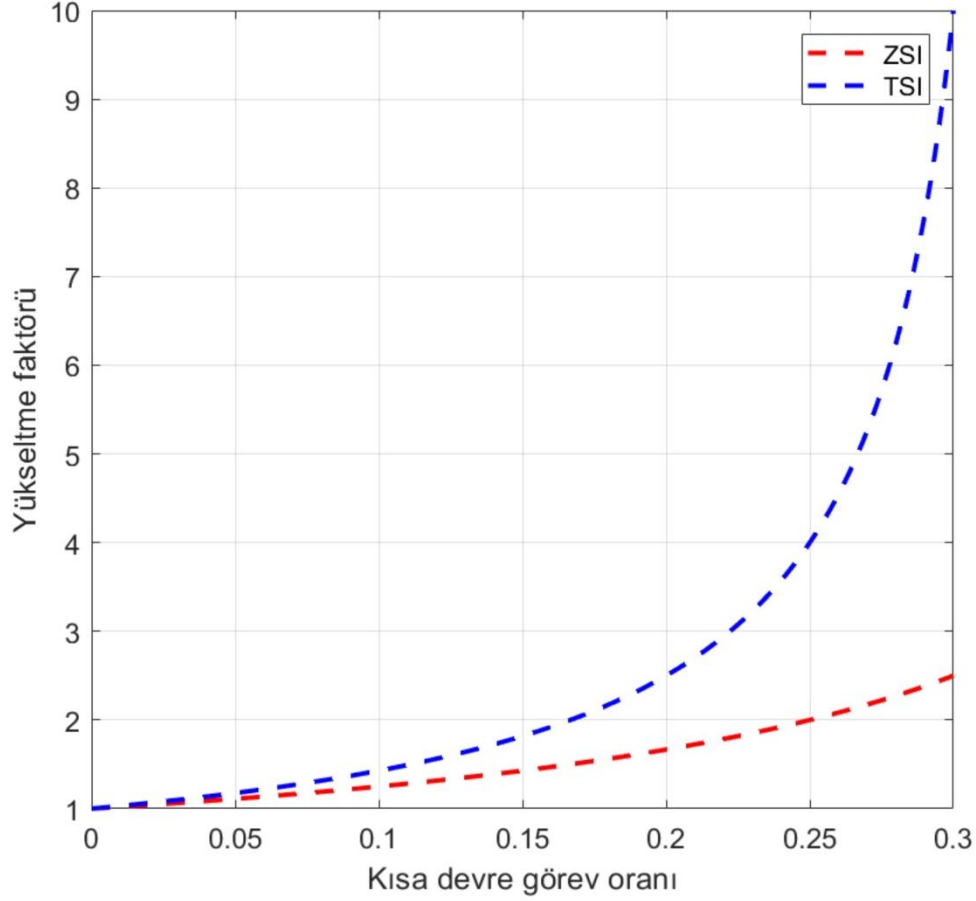
(b)

Şekil 7. TSI'de trafo sarım sayısı 1:1 için (a) $V_{PN}-V_C$ (b) V_{ac}
Figure 7. Simulation results of TSI for transformer turns ratio 1:1 (a) $V_{PN}-V_C$ (b) V_{ac}



Şekil 8. TSI'de trafo sarım sayısı 2:1 için (a) $V_{PN}-V_C$ (b) V_{ac}
Figure 8. Simulation results of TSI for transformer turns ratio 2:1 (a) $V_{PN}-V_C$ (b) V_{ac}

Benzetim sonuçları ve teorik analizler sonucunda elde edilen bulgulara göre, ZSI ve trafo sarım oranı 2:1 için TSI devresinde yükseltme faktörü ile kısa devre görev oranı değişim grafiği Şekil 9'da gösterilmiştir. Trafo sarım oranı $n > 1$ olması koşuluyla, kısa devre görev oranı daha büyük değerler aldığı anda ZSI ve TSI arasındaki yükseltme faktörü farkı eksponansiyel şekilde artmaktadır. Bu farkın temel nedeni; TSI devresinde trafo sarım oranının büyümesiyle kısa devre çalışmaya bağlı olarak bobin sargılarındaki enerjilenmenin artış göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 9. ZSI ve TSI için yükseltme faktörü ile kısa devre görev oranı değişim grafiği
 Figure 9. Boost factor versus shoot-through duty ratio for ZSI and TSI

SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Yapılan bu çalışmada, geleneksel VSI ve ZSI/qZSI devre yapılarının teorik kısıtlamalarını ortadan kaldıran TSI devresi teorik analiz ve benzetim çalışmaları yardımıyla incelenmiştir. DC hat gerilimi, kondansatör ve AC çıkış gerilim değerleri trafo sarım oranı 1:1 ve 2:1 değerleri için hesaplanmıştır. Anahtarlama elemanlarını sürmek amacıyla maksimum yükseltici kontrol tekniği uygulanmıştır. Benzetim sonuçlarında görüldüğü üzere trafo sarım oranının 1:1 olması durumunda TSI devresi, ZSI ile benzer performansta çalışmakta ve devre parametreleri değişmemektedir. Trafo sarım oranının 2:1 olduğu durumda sargılardaki enerjilenmenin artmasına bağlı olarak; yükseltme faktörü ve devrenin kazancında ZSI devresine göre yaklaşık %50 oranında artış sağlanmıştır.

TSI devresi; kısa devre çalışabilme özelliğiyle geleneksel VSI'lerden, DC katı ile anahtarlama elemanlarının sürüldüğü inverter güç katının aynı ortak referansa sahip olması ile ZSI'den ayrılmaktadır. Daha büyük yükseltme faktörü sağlaması ve daha az sayıda pasif devre elemanı kullanması, ZSI/qZSI devrelerine göre üstünlük sağlamaktadır. Aynı DC giriş geriliminde geleneksel ZSI/qZSI devreleri ile eşit büyüklükte AC çıkış gerilimi elde etmek için daha küçük kısa devre çalışma oranı ve buna bağlı olarak daha büyük modülasyon indeksinin kullanımı, TSI devresini daha avantajlı hale getirmektedir.

TSI devre yapısının mevcut inverterlere kıyasla sahip olduğu tek olumsuz tarafı; empedans katındaki T şeklinde bağlantılı yüksek frekanslı trafonun kaçak akı etkisinden dolayı, anahtarlama

esnasında kısa devre olmayan çalışma modunda MOSFET'ler üzerinde gerilim sıçramaları oluşmasıdır. Anlık olarak oluşan yüksek gerilim sıçramaları anahtarlama elemanlarına zarar verebileceğinden, bu durum kaçak akısı oldukça düşük olan bir trafo seçimiyle veya empedans katı ile anahtarlama elemanları arasında ilave koruyucu devre yapıları kullanılarak giderilebilir.

I. SEMBOLLER (SYMBOLS)

M: Modülasyon indeksi

B: Yükseltme faktörü

f_s: Anahtarlama frekansı

T: Anahtarlama periyodu

T₀: Kısa devre anahtarlama süresi

T₁: Kısa devre olmayan anahtarlama süresi

D: Kısa devre görev oranı

G: Kazanç






KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Adamowicz, M., Strzelecka, N., 2009, "T-source inverter", *Electrical Review*, Cilt 85, Sayı 10, ss. 1-6.
- Chen, Y., Smedley, K., 2008, "Three-Phase Boost-Type Grid-Connected Inverter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 23, Sayı 5, ss. 2301-2309.
- Dong, S., Zhang, Q., Cheng, S., 2016, "Analysis and design of snubber circuit for Z-source inverter applications", *IET Power Electronics*, Cilt 9, Sayı 5, ss. 1083-1091.
- Ebrahimi, S., Moghassemi, A., Olamaei, J., 2020, "PV inverters and modulation strategies: a review and a proposed control strategy for frequency and voltage regulation", *Signal Processing and Renewable Energy*, Cilt 4, Sayı 1, ss. 1-21.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., 2016, "Z-source inverter: Topology improvements review", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Cilt 10, Sayı 1, ss. 6-24.
- Endiz, M. S., Akkaya, R., 2020, "A Modified Quasi-Z-Source Inverter with Enhanced Performance Capability", *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, Cilt 10, Sayı 2, ss. 892-897.
- Estévez-Bén, A. A., Alvarez-Diazcomas, A., Rodríguez-Reséndiz, J., 2020, "Transformerless multilevel voltage-source inverter topology comparative study for PV systems", *Energies*, Cilt 13, Sayı 12, ss. 3261.
- Li, Y., Jiang, S., Cintron-Rivera, J. G., Peng, F. Z., 2012, "Modeling and control of quasi-Z-source inverter for distributed generation applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt 60, Sayı 4, ss. 1532-1541.
- Li, Y., Anderson, J., Peng, F. Z., Liu, D., 2009, "Quasi-Z-source inverter for photovoltaic power generation systems", *Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, ss. 918-924.
- Liu, H., Zhou, B., Li, Y., Chen, J., Loh, P. C., 2020, "High-Efficiency T-Source Inverter With Low Voltage Spikes Across the Switch Bridge", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 35, Sayı 10, ss. 10554-10566.
- Liu, W., Yuan, J., Yang, Y., Kerekes, T., 2018, "Modeling and control of single-phase quasi-Z-source inverters", *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, ss. 3737-3742.
- Liu, W., Niazi, K. A. K., Kerekes, T., Yang, Y., 2019, "A review on transformerless step-up single-phase inverters with different dc-link voltage for photovoltaic applications", *Energies*, Cilt 12, Sayı 19, ss. 3626.

- Mande, D., Trovão, J. P., Ta, M. C., 2020, "Comprehensive review on main topologies of impedance source inverter used in electric vehicle applications", *World Electric Vehicle Journal*, Cilt 11, Sayı 2, ss. 37.
- Nguyen, M. K., Lim, Y. C., Cho, G. B., 2011, "Switched-inductor quasi-Z-source inverter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 26, Sayı 11, ss. 3183-3191.
- Peng, F.Z., 2003, "Z-Source Inverter", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Cilt 39, Sayı 2, ss. 504-510.
- Sivaraman, P., Prem, P., 2017, "PR controller design and stability analysis of single stage T-source inverter based solar PV system", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Cilt 40, Sayı 3, ss. 235-245.
- Strzelecki, R., Adamowicz, M., Strzelecka, N., Bury, W., 2009, "New type T-source inverter", *Compatibility and Power Electronics*, ss. 191-195.
- Tang, Y., Xie, S., Zhang, C., 2010, "Single-phase Z-source inverter", *IEEE transactions on power electronics*, Cilt 26, Sayı 12, ss. 3869-3873.
- Zhu, M., Yu, K., Luo, F. L., 2010, "Switched inductor Z-source inverter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 25, Sayı 8, ss. 2150-2158.



INVESTIGATION OF WIND ENERGY POTENTIAL OF FOUR DIFFERENT SITES OF LIBYA BY USING WEIBULL DISTRIBUTION

¹Selcuk SELİMLİ , ²Fauzi Ammar Ahmed SHTEWI , ³Abdel Karim FAHED , ⁴Çağrı Yaman KOYMATCIK , ⁵Mehmet OZKAYMAK 

Karabuk University, Energy Systems Engineering, Karabuk, TURKEY

¹selcukselimli@karabuk.edu.tr, ²f_shtewi68@yahoo.com, ³fahedkazan82@gmail.com, ⁴kmcgil@gmail.com, ⁵mozkaymak@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 14.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.09.2021)

ABSTRACT: In this study wind energy capacity of Libyan sites are Espiaa, Msallata, Alqatrun, and Adirsiyah has been assessed with the Weibull distribution. Three different methods of Weibull distribution that are the Empirical Method of Justus (EMJ), the Graphical Method (GM), and the Maximum Likelihood Method (MLM) was used. As a result, the best velocity estimation performance has been obtained with graphical and maximum likelihood methods. The power density estimation showed that the wind power potential of Msallata is best with the value of 444.743 W/m² power density at 60 m and in Espiaa is in the second order with 414.98 W/m² potentials. Alqatrun is in the third order with the 184.134 W/m² power density and the last one is Adirsiyah with 101.201 W/m² potentials. When ordered for an elevation of 20 m, the power density of Msallata was found 418.502 W/m², 414.873 W/m² at Espiaa, 137.736 W/m² at Alqatrun, and 77.993 W/m² at Adirsiyah. The maximum power potential was determined at Msallata and the minimum at Adirsiyah. To investigate the most appropriate statistical method that provides the closest values to the real results, variance (R²), root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE), and mean absolute error (MAE) values were calculated and assessed that at Adirsiyah, the best results were obtained with the GM method for a height of 20 m. This situation was evaluated with a calculated maximum R² of 0.9948 and minimum values of 0.0245, 0.00037 RMSE, and MAE. For Espiaa, the GM method was determined as the most appropriate method with 0.9984 R², 0.0186 RMSE, 1.23e-06 MBE, and 0.00033 MAE values. For Msallata, the EMJ method was determined as the best method with 0.9985 R², 0.0146 RMSE, 2.4e-07 MBE, and 0.00022 MAE. For 60 m altitude, the EMJ method gave the most compatible results with 0.9957 R², 0.0221 RMSE, and 0.00027 MAE values in Adirsiyah. In Alqatrun, the MLM method provided the closest results with 0.9979 R², 0.0151 RMSE, 2.63e-06 MBE, and 0.00024 MAE. The MLM method for Espiaa was determined as the most suitable method with 0.9988 R², 0.0163 RMSE, 1.21e-06 MBE, and 0.00029 MAE. For Msallata, the EMJ method was determined as the most suitable method with 0.9986 R², 0.0163 RMSE, 1.83e-07 MBE, and 0.00019 MAE.

Keywords: Weibull distribution, wind speed, power density, wind energy.

Libya'nın Dört Farklı Bölgesinin Rüzgâr Enerji Potansiyelinin Weibull Dağılımı ile İncelenmesi

ÖZ: Bu çalışmada, Libyanın Espiaa, Msallata, Alqatrun ve Adirsiyah bölgesinin rüzgâr enerjisi kapasitesi Weibull dağılımı ile değerlendirilmiştir. Justus'un Ampirik Yöntemi (EMJ), Grafik Yöntemi (GM) ve Maksimum Olabilirlik Yöntemi (MLM) olmak üzere üç farklı Weibull dağılımı yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, en iyi hız tahmin performansı grafiksel ve maksimum olabilirlik yöntemleri ile elde edilmiştir. Güç yoğunluğu tahminlemesine göre Msallata'nın rüzgâr gücü potansiyelinin 60 m yükseklikte 444.743 W/m² güç yoğunluğu ile en iyi olduğu ve Espiaa'da ise 414.98 W/m² potansiyel ile ikinci sırada olduğunu görülmüştür. Alqatrun 184.134 W/m² güç yoğunluğu ile üçüncü sırada, sonuncu sırada ise 101.201 W / m² potansiyeli ile Adirsiyah belirlenmiştir. 20 m yükseklik için Msallata'nın güç

yoğunluğu 418.502 W/m², Espiaa'da 414.873 W/m², Alqatrun'da 137.736 W/m² ve Adirsiyah'da 77.993 W/m² olarak belirlenmiştir. Maksimum güç potansiyeli Msallata'da, minimum ise Adirsiyah'da belirlenmiştir. Gerçek sonuçlara en yakın değerler sağlayan en uygun istatistiksel yöntemi belirlemek için varyans (R²), kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama sistematik hata (MBE) ve ortalama mutlak hata (MAE) değerleri hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Adirsiyah'ta 20 m yükseklik için en iyi sonuçlar GM yöntemi ile elde edilmiştir. Bu durum hesaplanan 0.9948 maksimum R² ve minimum 0.0245, 0.00037 RMSE ve MAE değerleri ile değerlendirilmiştir. Alqatrun'da MLM yöntemi 0.9899 R², 0.0335 RMSE, 0.00049 MAE ile en uygun yöntem olarak ve en düşük karşılaştırma değeri olan 1.7e-5 MBE ile belirlenmiştir. Espiaa için GM yöntemi 0.9984 R², 0.0186 RMSE, 1.23e-06 MBE ve 0.00033 MAE değerleri ile en uygun yöntem olarak belirlendi. Msallata için EMJ yöntemi 0.9985 R², 0.0146 RMSE, 2.4e-07 MBE ve 0.00022 MAE değerleri ile en iyi yöntem olarak belirlendi. 60 m yükseklik için Adirsiyah'ta EMJ yöntemi 0.9957 R², 0.0221 RMSE ve 0.00027 MAE değerleri ile en uyumlu sonuçları vermiştir. Alqatrun'da MLM yöntemi 0.9979 R², 0.0151 RMSE, 2.63e-06 MBE ve 0.00024 MAE değeri ile en yakın sonuçları sağlamıştır. Espiaa için MLM yöntemi 0.9988 R², 0.0163 RMSE, 1.21e-06 MBE ve 0.00029 MAE değeri ile en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. Msallata için EMJ yöntemi 0.9986 R², 0.0163 RMSE, 1.83e-07 MBE ve 0.00019 MAE ile en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Weibull dağılımı, rüzgâr hızı, güç yoğunluğu, rüzgâr enerjisi.

1. INTRODUCTION

Compared to fossil fuels that face the risk of depletion, wind energy is sustainable, environmentally friendly, and accessible in a wide geography. The development and improvement of communities are directly related to the sustainability of energy. In addition, due to the increased sensitivity to the environment, a global trend towards renewable energy resources is observed to a great extent. Libya has more than 48 billion barrels of oil reserves, or just under 3% of the world total, with a backup-replacement rate of 153 years [1]. By 2021, the Libyan national oil company produces only 1.22 million barrels a day on average but hopes to increase this to 2.1 million barrels per day by 2024 [2]. The natural gas proved reserve of the country is 51.3 billion cubic meters, it is estimated that the real reserve is approximately twice this amount with the unproven reserve [3]. The life and industrial activities of the country are carried out intensively with fossil fuel consumption. Fossil fuel-based national electricity consumption is about 33 TWh per year and in 2020 wind-based part is 65 GWh [4, 5]. According to the data of the United Nations, the population of Libya in 2020 is approximately 6,871,292 people, and the population growth rate has been approximately 2.2% since 1970 [6]. Libya from countries that live energy crisis is due to the dependence on only oil and gas energy [7]. With the increase in population, the need for electrical energy increases about 8-10% per year [8]. Approximately 65% of electricity demand in Libya is from thermal power plants that use petroleum-based fuels, and the rest use natural gas and petroleum by-products [9]. The emission value of CO₂ emitted for electricity generation in Libya is 54% of the total emission and it is important that use renewable energy even only for emission reduction in Libya [10]. If oil-rich Libya wants to strengthen its oil-dependent economy in line with its future sustainability and environmental policies, it should also take steps in renewable energy and technologies. Especially in recent years, the civil war and destructions have significantly increased the need for energy and increased the importance of renewable energy applications. It is important to investigate the availability of wind and solar energy, especially in the country, 88% of which is desert [11]. Considering the African continent, Libya has significant potential with its annual wind capacity [12]. Libya has a 1900 km long coast where the wind speed does not fall below 5 m/s [13]. The average wind power density varies from 164 to 426 W/m² in the country [14]. Renewable energies (wind, solar) take less than 1% of the energy supply of Libya and did not have a priority in energy politics until 2013 [15]. Problems erupting in Libya have hampered the plan to generate energy which is 10% of total electricity demand equivalent to 2,219 GW from renewable energy, until 2025[8]. Elmabruk et al. studied the wind energy and potential with Weibull distribution in some selected regions are Derna,

Musrata, Zuara, and Sebha of Libya. They concluded that the mean annual wind speeds over 7.8 m/s at Derna and has a higher energy capacity than other regions [16]. Hasan et al. evaluated the annual performance of the wind resource at the Zawiya region in the northwest of Libya with Weibull distribution [17]. Kassem et al. used Weibull distribution function to analyze the characteristics of wind speed in Libya. They assessed that the annual mean wind speed for the three regions considered in this study is ranging from 2.1 to 4.1 m/s at 10 m, which indicates that the investigated regions have low wind energy potential [18]. Elmabrouk investigated the wind energy potential of some of the Libyan sites by using Weibull distribution method. He concluded that Misurata has maximum energy potential with an annual average wind speed is over 4.88 m/s [19]. Ali et al. provided a comparative evaluation of six methods for computing the Weibull parameters for Al-Aziziyah city of Libya. They argued that the statistical techniques that have been studied can help evaluate the Weibull distribution parameters for the measured data as the RMSE, Chisquare, and R^2 values have similar magnitudes [20]. Elfarra and Silini studied on four selected different location near to the Libyan coast to do technical and economical evaluation of wind energy capacity by using real data with Weibull distribution. They suggested that use of Weibull parameters has remarkable effects on the evaluation of wind energy production [21]. Katsigiannis et al. examined the impact of the type of wind turbine classes on the wind sources electricity production in two regions of Cyprus Island. Resultantly presented that the superiority of design of wind turbines for lower wind speeds IEC III class in terms of power production [22]. Al-Nassar et al. determined the wind profile of different locations in the site of Kuwait with Weibull distribution. Maximum power density is observed at 30 m elevation is between 130 to 275 W/m² [23]. Mostafaeipour et al. studied the case and wind energy potential in Iran with Weibull distribution. Annual average value of wind power density is asserted approximately 110.6 W/m², wind power class of the state is determined 2 [24]. Ko et al. assessed the wind energy potential of Chuuk State, Micronesia. Wind energy density of Chuuk State was determined about 157.08 W/m² [25]. Irwanto et al. presented the wind speed profile estimation of Chuping and Kangar in Perlis, Malaysia. They discussed due to the Weibull distribution analyses that speed and probability of the wind is calculated approximately 0.97 m/s and 73% in Chuping, and in Kangar are 2.5 m/s and 45% [26]. Ahwide et al. concerned with the available wind energy data to investigate the electricity production in Libya. They concluded that yield of energy can be gained by the primary level of specific rate of energy is approximately of 820W/m² [27]. Kassem et al. presented the analyze of wind speed characteristics of Libya's eastern Mediterranean coast. The results showed that the annual speed of wind and power density of it are 4.35 m/s and 50.90 W/m² [28]. Mrehel et al. attempted to investigate the capacity of wind power in Libyan's southern state. The annual power density ranges among to 409.7 W/m² at Hun site and 693 W/m² at Alqatrun [5]. With the study, it is aimed to raise awareness about the importance of the tendency to renewable energy sources and the geographical potential in countries such as Libya, which have intensive fossil fuel based production and life. While statistical data are presented in many studies in the literature, whereas in this study statistical data were supported by comparing with real data, and different methods of Weibull distribution results were compared. In this study, technical assessment of the wind energy potential for four different sites, where are Msallata, Espiaa, Adirsiyah and Alqatrun of Libya. Adirsiyah is in the eastern coast and other two states are Espiaa and Msallata in the western coast and Alqatrun is in south. Three separate approaches, that are EMJ, GM and MLM methods of Weibull distribution were used in the determination of Weibull parameters. The Weibull distribution data that are determined by each method has been compared with the real data. Error analysis were done by calculation of R^2 , RMSE, MBE and MAE and by checking for the validity. The impacts of alternative Weibull parameters on the calculation results are also addressed. Wind energy potential of states are also identified and presented in this study. Assessment of wind power capability of four different Libyan sites are Msallata, Espiaa, Adirsiyah and Alqatrun has been done with taken annual wind data from Libyan National Meteorological Center.

2. METHODOLOGY

2.1. Wind Speed Estimation

Wind power potential assessment requires wind speed determination. The obstacle on the ground surface and the surface roughness creates shear stress that suppresses wind speed, this stress zone formed between the earth's surface and approximately 5 km above of it is defined as the layer of atmospheric boundary. A logarithmic determination as seen in Eq. (1) or alternative power law as seen in Eq. (2) is a good method for determining the wind speed for the region [29, 30].

$$\frac{v}{v_o} = \frac{\ln \frac{h}{z}}{\ln \frac{h_o}{z}} \quad (1)$$

$$\frac{v}{v_o} = \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (2)$$

Where v_o is the reference wind speed at a height h_o , v is the wind speed at height h , α is the shear exponent which depends on the roughness of the terrain and z is the roughness length. The roughness length and shear exponent that is dependent on the characteristics of the terrain is given in Table 1.

Table 1. Surface-related parameters of the terrain.

Type of terrain	Roughness class	Roughness length z (m)	Shear exponent (α)
Water area	0	0.001	0.01
Nation clear, few surface characteristics	1	0.12	0.12
Agriculture of hedges and houses	2	0.05	0.16
Agriculture of multiple crops, woods, and villages	3	0.3	0.28

Wind data were analyzed for heights of 20 m and 60 m using three different parametric value determination types of the Weibull distribution method.

2.2. Determination of Weibull Distribution Parameters by Different Methods

Weibull distribution method can be applied with different alternative parameterizations for different disciplinary problems [31]. In this study, EMJ, GM, and MLM are used to determine the parameters. The parametric form of probability density and cumulative distribution functions of Weibull distribution is expressed in Eq. (3) and Eq. (4) [32].

$$F(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (k > 0, v > 0, c > 1) \quad (3)$$

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (4)$$

$F(v)$ is the probability of wind speed, k is the dimensionless shape parameter, and c is the scale parameter (m/s). The relations that give the Weibull distribution parameters according to the EMJ are given in Eq. (5) and Eq. (6) [33].

$$k = \left(\frac{v_m}{\sigma} \right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (6)$$

In the relations v_m presents mean wind speed (m/s) and can be equated as in Eq. (7), σ is the standard deviation of wind speed, Γ is the gamma function and is defined as in Eq. (8) [34, 35].

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (7)$$

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{t-1} dx \quad (8)$$

Where; n is the number of observations. The standard deviation of wind speed is defined with the relation is seen in Eq. (9) [36].

$$\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2 \right]^{0.5} \quad (9)$$

Equations give the parameters of the Weibull distribution according to the GM is presented in Eq. (10) [37].

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln v - k \ln c \quad (10)$$

Firstly, by using wind speed data, the cumulative frequency distribution is calculated, then by using the frequency distribution, the cumulative frequency distribution can be obtained. Then, pairs are $\ln v$ and $\ln[-\ln(1 - F(v))]$ be solved. Lastly, shape and scale parameters are found by solving linear least squares relation. The parameters are related as in Eq. (11) and Eq. (12) [38].

$$k = a \quad (11)$$

$$c = e^{-\frac{b}{a}} \quad (12)$$

Weibull distribution parameters can be determined with the functions are seen in Eq. (13) and Eq. (14) according to the MLM [39].

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln v_i \right]^{-1} \quad (13)$$

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (14)$$

2.3. Statistical Error Analyses

The accuracy of applied methods is investigated by some statistical approximations that are the determination of variance (R^2) in Eq. (15), the root means square error (RMSE) in Eq. (16), mean bias error (MBE) in Eq. (17), and mean absolute error (MAE) in Eq. (18) [35, 40].

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (16)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (17)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (18)$$

x_i, y_i and z_i present predicted i^{th} wind speed, i^{th} wind speed of real data and average wind speed.

2.4. Wind Power Density

Wind power density (*WPD*) is calculated to determine the wind energy potential with the formula is seen in Eq. (19) [41].

$$WPD = \frac{1}{2}\rho v_h^3 \quad (19)$$

ρ is the air density, and v_h is the wind speed at hub elevation.

The wind turbine power production (*P*) can be calculated with Eq. (20) [29].

$$P = \frac{1}{2}\rho C_p A_t v_h^3 \quad (20)$$

P represents the power, C_p designates the turbine capacity parameter, A_t swept sectional area of the turbine.

3. CASE STUDY

In this study, it has been tried to determine the wind energy potential for the Msallata, Espiaa, Alqatrun, and Adirsiyah sites in Libya by using monthly average wind speed data for a year were obtained for 20 m and 60 m altitudes to evaluate medium and upper altitude from the Libyan National Meteorological Agency and evaluated within the scope of the study.

3.1. Site Location and Wind Speed Data

The locations of four Libyan sites are Msallata, Espiaa, Adir Siyah, and Alqatrun, locations and wind potential are presented in Fig. 1.

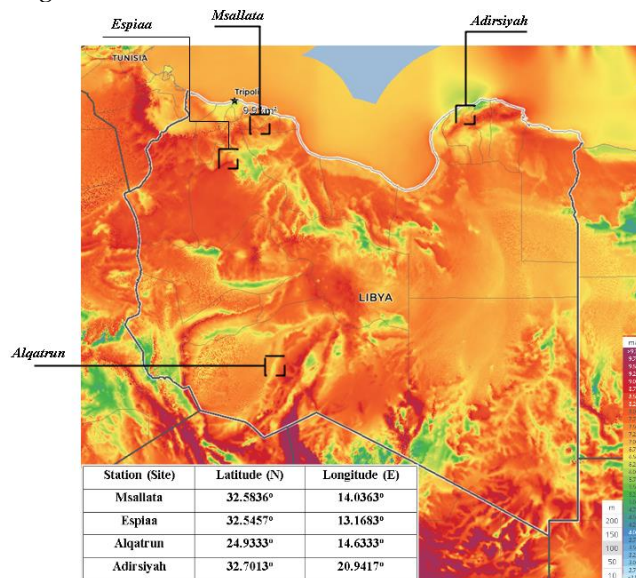


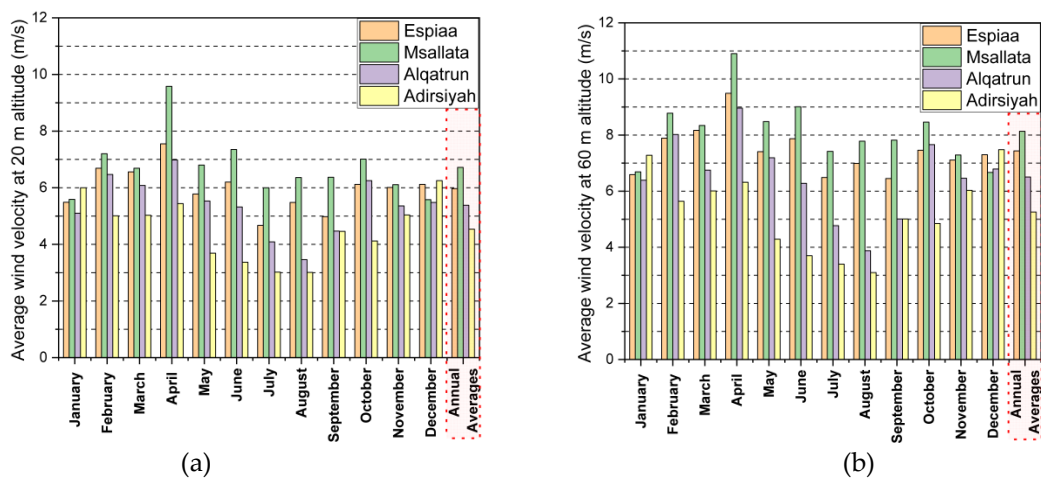
Figure 1. Geographic location and wind map of studied states.

Msallata and Espiaa are in the northwest of Libya. Adirsiyah is in the northeast and Alqatrun is in the southwest of the country. Altitude above sea level and estimated atmospheric air pressure and density from thermodynamic tables [42] and relative humidity data are taken from Libyan National Meteorological Agency for Msallata, Espiaa, Adir Siyah, and Alqatrun are given in Table 2.

Table 2. Altitude of four state and atmospheric air properties.

Station (Site)	Altitude (m)	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)	Relative humidity (%)
Msallata	198 m	98.97	1.202	58
Espiaa	156 m	99.47	1.207	55
Alqatrun	518 m	95.26	1.165	43
Adirsiyah	332 m	97.40	1.186	70

Local wind speed and power values were evaluated for heights of 20 and 60 m from the ground. The surface characteristics related to parameters of the terrain are evaluated due to Table 1. When the data presented in Fig. 2 (a, b), in which wind regimes are visualized monthly for 20 and 60 m altitudes, are examined, a monthly evaluation of the maximum and minimum wind potentials for each location can be made for a year.

**Figure 2.** Monthly average wind speeds at a) 20m and b) 60 m.

When the values are given for 20 m height in Fig. 2(a) are examined, the maximum wind speed values for Espiaa, Msallata, and Alqatrun are 7.55, 9.58, and 6.98 m/s in April, respectively, while for Adirsiyah it is 6.25 m/s. The maximum value of speed is seen in December for Adirsiyah. Minimum wind speed values were determined as 4.67, 5.58, 3.46, 3.01 m/s, respectively, in Espiaa in July, in Msallata in November, and in Alqatrun and Adirsiyah in August. When the annual average values are examined, for a height of 20 m, Msallata has 6.72 m/s, Espiaa 5.97 m/s, Alqatrun 5.38, and Adirsiyah 4.53 m/s wind speed values. As seen in Figure 2(b), the maximum wind speed was determined at 60 m high in April for Espiaa, Msallata, and Alqatrun with values are 9.49, 10.9, and 8.96 m/s, and 7.48 m/s in December for Adirsiyah. Minimum wind speed was determined in September for Espiaa, in December for Msallata, and in August for Alqatrun and Adirsiyah with values are 6.45, 6.66, 3.88, and 3.1 m/s. The annual average wind speed values for Espiaa, Msallata, Alqatrun, and Adirsiyah are 7.43, 8.13, 6.5, and 5.25 m/s. Oner et al. assessed that the fields where the wind speed values are over 5 m/s can be seen as suitable for a wind farm [43]. In this respect, entire sites have wind power production capacity, but the most feasible one is Msallata.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The annual average wind speed frequency curves are plotted for all the sites in Fig. 3 for a) 20 m and b) 60 m elevation.

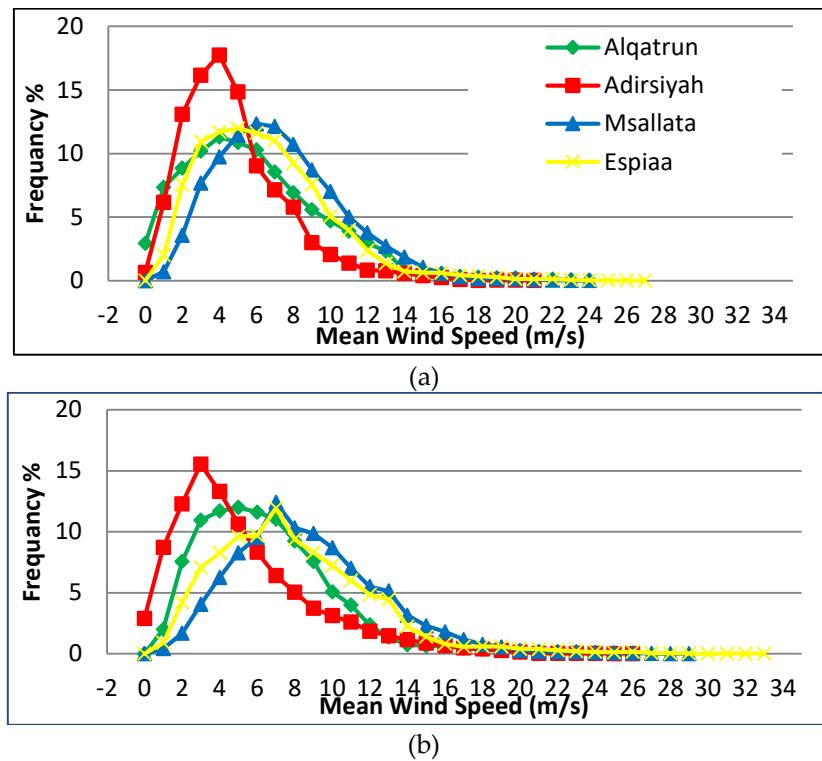
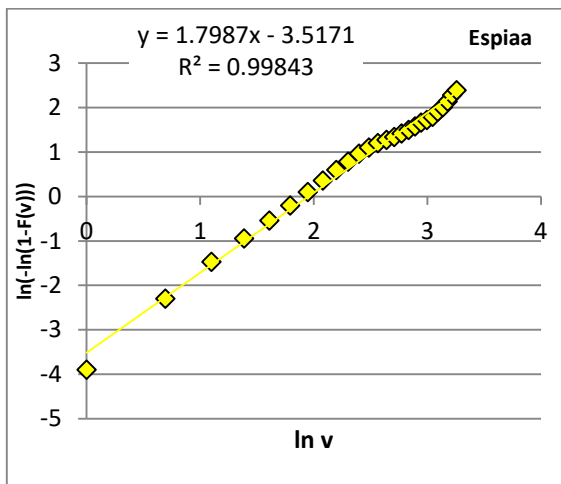
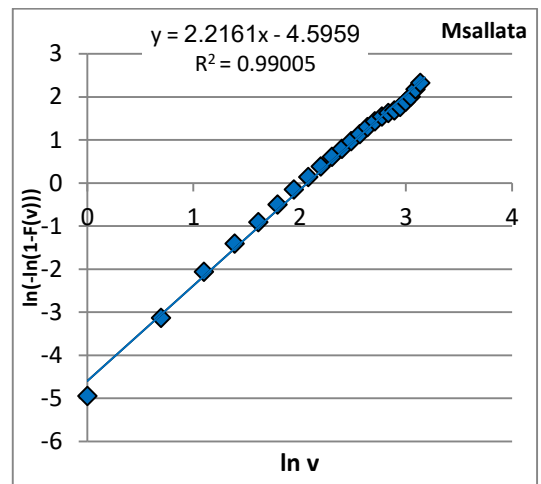


Figure 3. Measured annual frequency distribution at a) 20 m, b) 60 m.

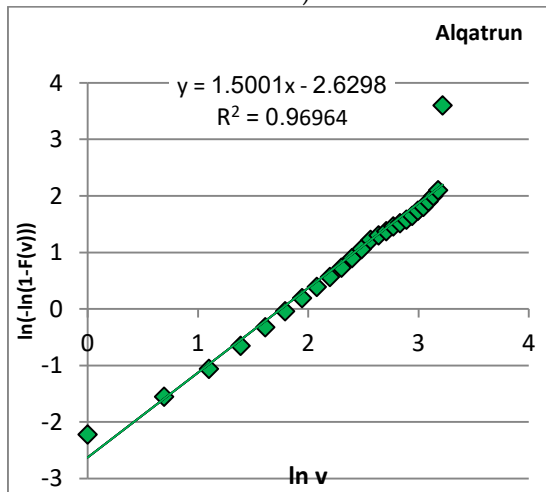
In Alqatrun, the wind at an altitude of 20 m has a speed of 5 m/s at a rate of 10.87%. This rate was determined as 14.83% in Adirsiyah, 11.46% in Msallata, and 11.98% in Espiaa. The wind has a speed value of 6 m/s at a rate of 10.28% in Alqatrun. This rate is 9% in Adirsiyah, 12.34% in Msallata, and 11.61% in Espiaa. When the energy producibility was evaluated in terms of consistency, Msallata, Espiaa, Alqatrun, and Adirsiyah rankings were evaluated numerically. The maximum frequency value was determined at 12.34% for 6 m/s wind speed in Msalata, with 11.98% for 5 m/s in Espiaa, 17.75%, and 11.29% for 4 m/s in Adir Siyah and Alqatrun. At 60 m altitude, 5 m/s wind speed is 11.98% in Alqatrun, 10.63% in Adirsiyah, 8.28% in Msallata and 9.62% in Espiaa. For 6 m/s wind speed in the same order is 11.61%, 8.33%, 9.52%, and 9.67%. The productibility of the energy was evaluated in terms of consistency, and the ranking of Msallata, Espiaa, Alqatrun, and Adirsiyah was evaluated numerically. The peak frequency value was determined at 12.40% and 11.94% for 7 m/s wind speed in Msalata and Espiaa, while 11.98% for 5 m/s in Alqatrun, 15.54% for 3 m/s in Adirsiyah. The Weibull parameters were calculated using the three different methods that are, EMJ, GM, and MLM. The results corresponding to the GM related with the log-linear regression for each site are shown in Fig. 4(a, b, c, d) for 20 m elevation and Fig. 5(a, b, c, d) for 60 m elevation.



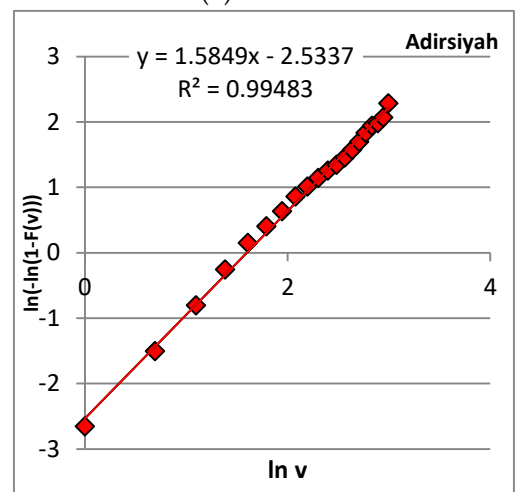
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4. (a, b, c, d) GM to estimate the Weibull parameters at 20m.

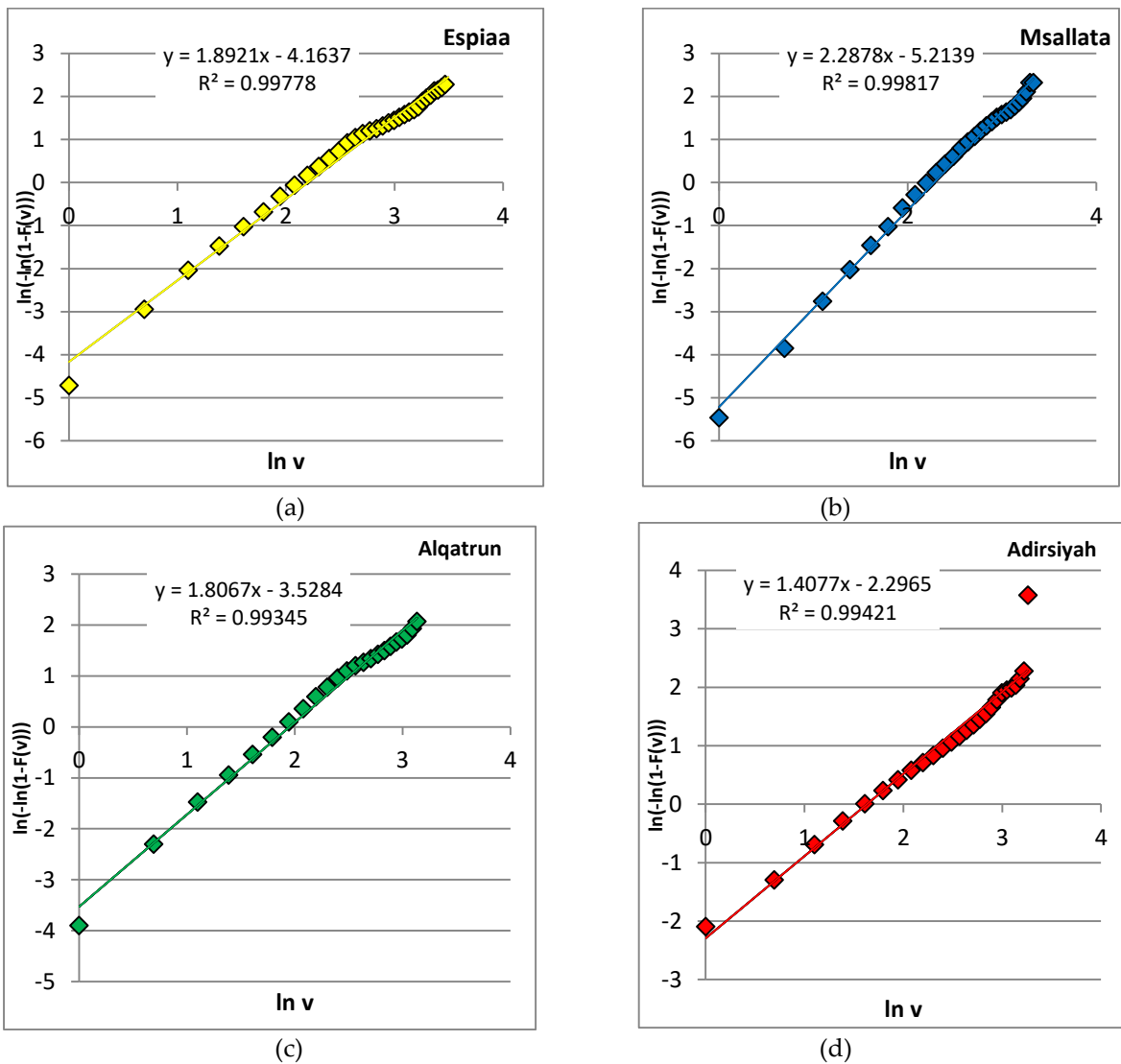


Figure 5. (a, b, c, d) GM to estimate the Weibull parameters at 60m.

Determination of Weibull parameters that are shape parameter (k) and scale parameter (c) is necessary. The scale parameter can be related to the mean wind speed and the shape factor, which determines the consistency of wind speed at a given location [44]. The determined parameters with three different methods were given in Table 3 and Table 4 for 20 m and 60 m elevations.

Table 3. Weibull Parameters are estimated by three different methods for 20 m elevations.

Site	Methods					
	GM		EMJ		MLM	
	k	c	k	c	k	c
Msallata	2.2161	7.9562	2.341	8.172	2.552	8.344
Espiaa	1.7987	7.0664	2.215	7.224	2.223	7.515
Alqatrun	1.5001	5.7665	1.613	6.625	1.721	6.763
Adirsiyah	1.5849	4.9481	1.672	5.076	2.094	5.634

Table 4. Weibull Parameters were estimated by three different methods for 60 m elevations.

Site	Methods					
	GM		EMJ		MLM	
	<i>k</i>	<i>c</i>	<i>k</i>	<i>c</i>	<i>k</i>	<i>c</i>
Msallata	2.2878	9.7733	2.423	9.814	2.643	10.020
Espiaa	1.8921	9.0298	2.045	9.024	2.290	9.185
Alqatrun	1.8067	7.0533	1.981	7.282	2.214	7.491
Adirsiyah	1.4077	5.1134	1.435	5.750	1.721	6.094

When the value of shape parameter compared to four sites, it is seen that in Table 4, the highest value of it was determined 2.643 for Msallata, 2.29 for Espiaa, 2.214 for Alqatrun, and 1.721 for Adirsiyah with MLM. The lowest values were determined as 2.2878 for Msallata, 1.8921 for Espiaa, 1.8067 for Alqatrun, and 1.4077 for Adirsiyah with GM. The highest value of *k* means the more stable wind blow at a state. MLM method gives a higher value for the *k* parameter in each studied site while the GM method gives the lowest value for the *k* parameter. Similarly, for *c* the maximum variation from mean wind speed has been determined with MLM and minimum with GM for each site and at two different elevations. By using the Weibull parameters, the probability density function and cumulative distribution function can be determined. The probability density function corresponds to the wind blow frequency. Calculated probability density function values with EMJ, GM, and MLM were fitted against the frequency of the actual wind data in Fig. 6(a, b, c, d) and Fig. 7(a, b, c, d).

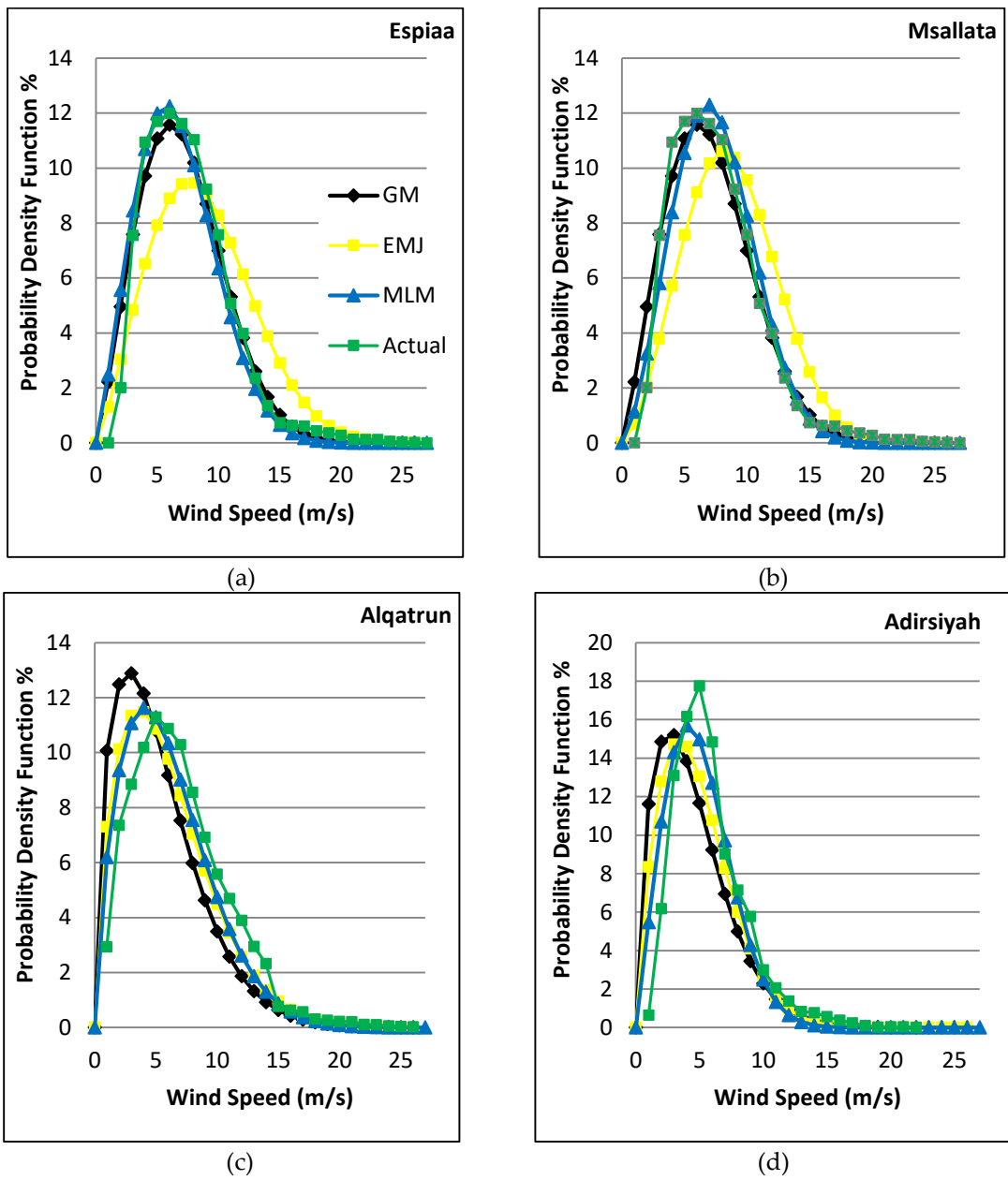


Figure 6. (a, b, c, d) Comparison of the probability density function at 20m.

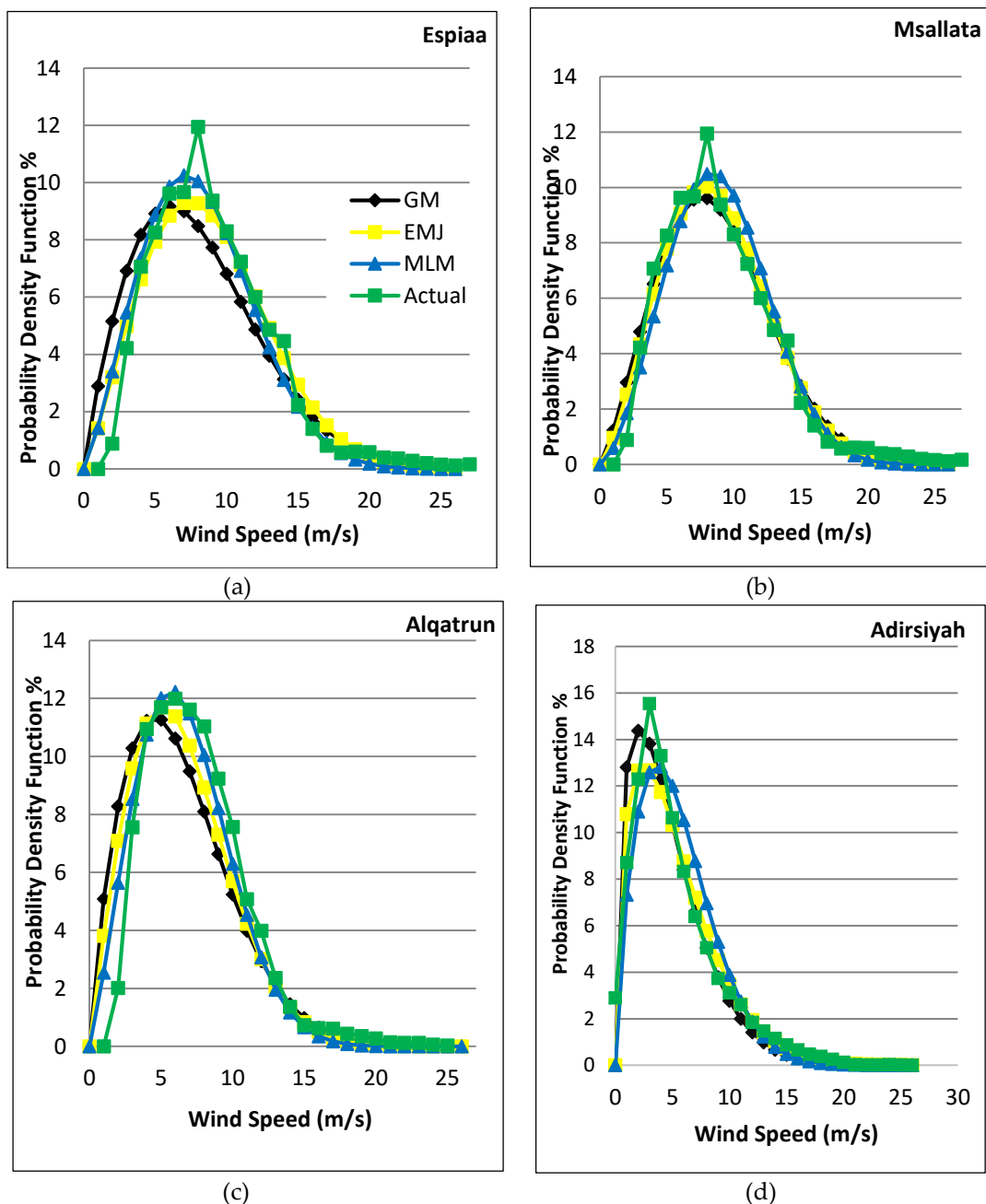


Figure 7. (a, b, c, d) Comparison of the probability density function 60m.

Fig. 6(a, b, c, d) and Fig. 7(a, b, c, d) show that the estimated wind speed is lower than the actual at Adirsiyah and Alqatrun. At Espiaa and Msallata the estimated and actual data are overlapped well, and the higher wind speed values have a higher probability than other sites. According to the Fig. 6(a, b, c, d) the most probable wind speed for Espiaa is 6 m/s with (11.57% probable), for Msallata is 8 m/s with (10.6% probable), for Alqatrun is 4 m/s with (11.62% probable), and for Adirsiyah is 3 m/s with (15.19% probable) at 20 m elevation. In the same order at 60 m elevation the values reach to 7 m/s (10.25% probable), 8 m/s (10.02% probable), 6 m/s (12.22% probable) and 3 m/s (12.67% probable) as seen in Fig. 7(a, b, c, d). Evaluation of peak and tail fit of different methods showed that the best fitting was obtained with the MLM for each different site. The different methods of cumulative distribution function estimation are presented in Fig. 8(a, b, c, d) and Fig. 9(a, b, c, d) for 20 m and 60 m elevation data.

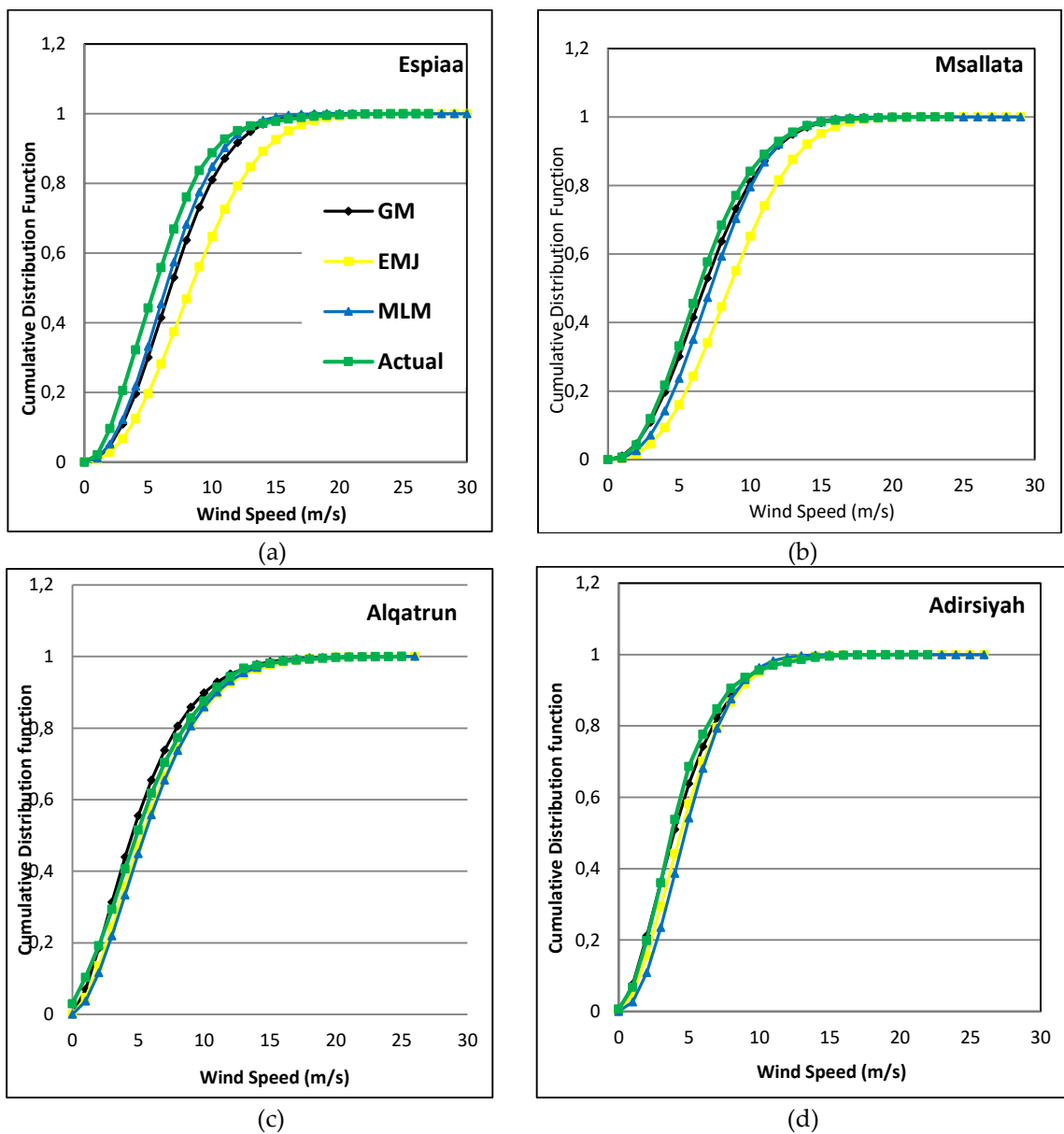


Figure 8. (a, b, c, d). The cumulative distribution function for the sites at 20m height.

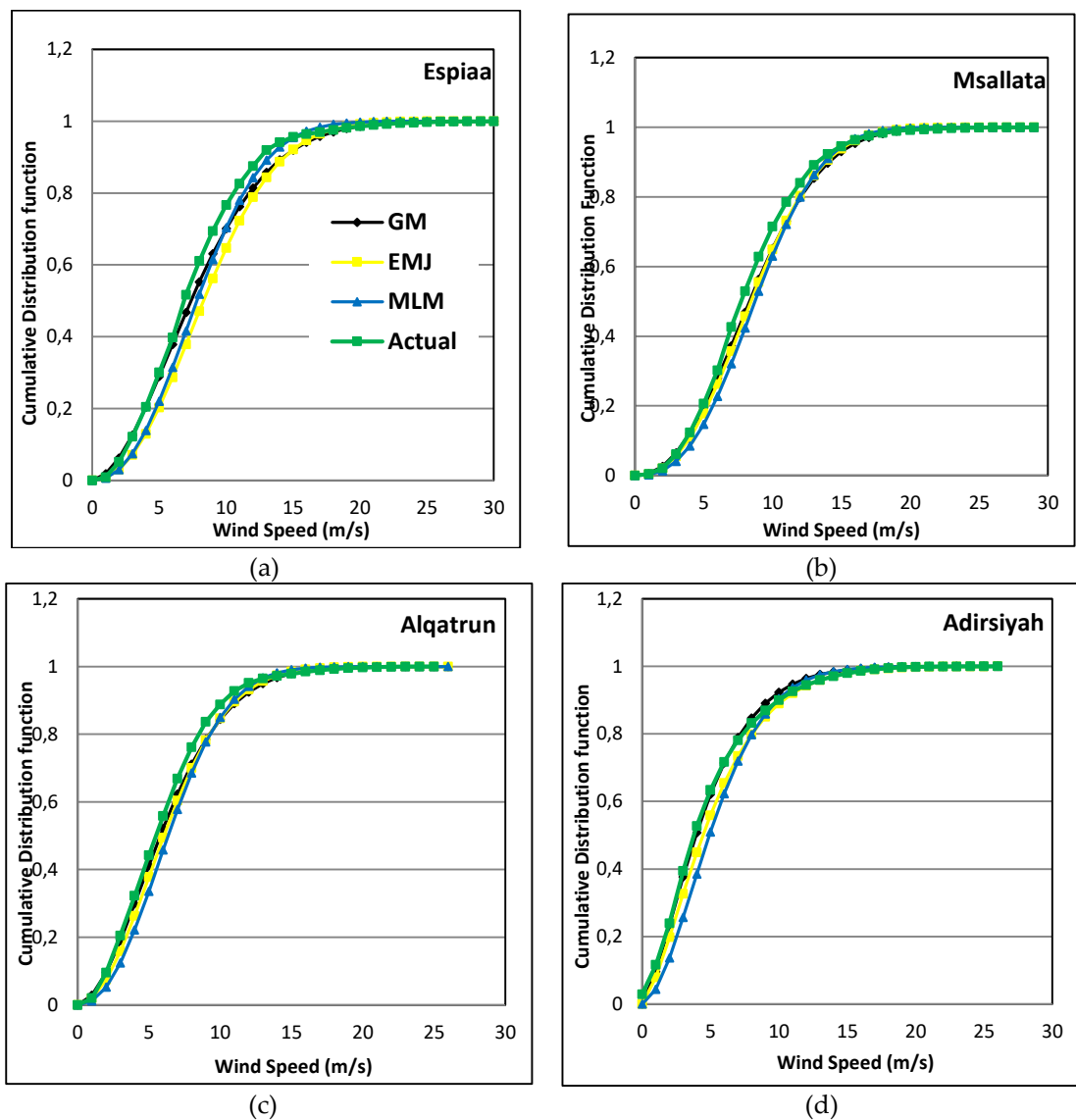


Figure 9. (a, b, c, d) Cumulative distribution function for the sites at 60m height.

When the curves given in Fig. 8(a, b, c, d) and Fig. 9(a, b, c, d) are examined, it is evaluated that all methods provided significantly close estimations with the actual data. The best estimate is feasible with GM. The errors associated with the different Weibull methods are calculated and shown in Tables 5 and 6. The closest values to zero for RMSE, MBE, and MAE verify that methods for calculating the Weibull parameters in this study are accurate and can be used for a wind energy assessment. Also, the R^2 values are close to 1.0 for all the methods in all the sites which proves the accuracy of the used methods [21].

Table 5. Error analysis results (20m).

Sites	Method	R ²	RMSE	MBE	MAE
Adirsiyah	GM	0.9948	0.0245	4.31e-05	0.00037
	EMJ	0.9947	0.0248	2.08e-05	0.00039
	MLM	0.9855	0.0409	7.47e-06	0.00064
Alqatrun	GM	0.9696	0.0583	4.3e-05	0.00080
	EMJ	0.9852	0.0406	2.53e-05	0.00060
	MLM	0.9899	0.0335	1.73e-05	0.00049
Espiaa	GM	0.9984	0.0186	2.26e-06	0.00033
	EMJ	0.9972	0.0247	1.23e-6	0.00042
	MLM	0.9965	0.0278	2.52e-06	0.00048
Msallata	GM	0.9900	0.0379	2.26e-06	0.00065
	EMJ	0.9985	0.0146	2.4e-07	0.00022
	MLM	0.9947	0.0275	4.74e-07	0.00048

Table 6. Error analysis results (60m).

Sites	Method	R ²	RMSE	MBE	MAE
Adirsiyah	GM	0.9942	0.0259	6.57e-05	0.00031
	EMJ	0.9957	0.0221	5.25e-05	0.00027
	MLM	0.9933	0.0277	2.07e-05	0.00041
Alqatrun	GM	0.9934	0.0270	1.22e-05	0.00041
	EMJ	0.9968	0.0188	6.43e-06	0.00028
	MLM	0.9979	0.0151	2.63e-06	0.00024
Espiaa	GM	0.9977	0.0222	7.48e-06	0.00033
	EMJ	0.9973	0.0241	1.51e-06	0.00041
	MLM	0.9988	0.0163	1.21e-06	0.00029
Msallata	GM	0.9981	0.0162	1.07e-06	0.00023
	EMJ	0.9986	0.0142	5.88e-07	0.00019
	MLM	0.9978	0.0178	1.83e-07	0.00027

As seen in Table 5, the best distribution performance was determined by GM at Adirsiyah and Espiaa for 20 m elevations. MLM results best fits for Alqatrun and EMJ results for Msallata concerning RMSE, MAE, MBE, and R² criteria. The methods were evaluated for 60 m elevation and determined that EMJ gives better performance at Adirsiyah and Msallata as seen in Table 6. In Table 5, it can be seen that MLM at Alqatrun and Espiaa gives the best modeling performance. The lowest MBE value is determined with the MLM for Adirsiyah and Alqatrun, EMJ for Espiaa and Msallata at 20 m elevation. The lowest values for MAE were determined for Adirsiyah and Espiaa with GM, for Alqatrun with MLM, for

Msallata with EMJ as seen in Table 5. By the assessment of data for 60 m elevation in Table 6, the lowest MBE values were obtained with MLM for four sites. The lowest MAE values were determined with MLM for Alqatrun and Espiaa and with EMJ for Adirsiyah and Msallata. Wind power density classifications are described in the literature as seen in Table 7 [45].

Table 7. Classification according to the wind power density [45].

Wind resource category	Wind class	Wind speed (m/s)	Wind power density(W/m ²)
Poor	1	3.5-5.6	50-200
Marginal	2	5.6-6.4	200-300
Moderate	3	6.4-7.0	300-400
Good	4	7.0-7.5	400-500
Excellent	5	7.5-8.0	500-600
Excellent	6	8.0-8.8	600-800
Excellent	7	Above 8.8	Above 800

The estimated wind speed and wind power density for each site and the elevation with different Weibull methods are seen in Fig.10 and Fig. 11.

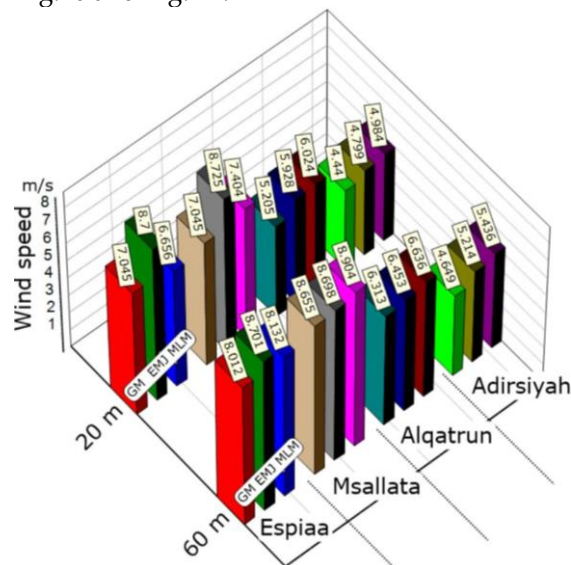


Figure 10. Wind speed at different elevations and locations due to the statistical approximation

The maximum wind speed of approximately 8.7 m/s was determined with EMJ method at Espiaa as well as 20 m and 60 m elevation. The maximum wind speed of 8.725 m/s at 20 m elevation and 8.698 m/s at 60 m was determined with EMJ in Msallata. The power density of the wind is also illustrated in Fig. 11, and it is seen that the power density at 20 m and 60 m elevation is 414.873 W/m² and 414.98 W/m² due to the EMJ. According to Table 7, Espiaa wind class 4 and category were evaluated as good. The highest wind power density state is in the Msallata and the wind power density 20 m and 60 m elevation was determined about 418.502 W/m² and 444.743 W/m² and for each elevation, the class of wind can be assessed as Class 4 and in the good category due to the Table 7. In Alqatrun and Adirsiyah the wind speed is seen lower than Espiaa and Msallata. The peak speed at Alqatrun is approximately 6.024 m/s at 20 m elevation and 6.636 m/s at 60 m elevation due to the MLM. In Adirsiyah, these speed values reach 4.984 m/s and 5.436 m/s in the same order. The wind power density values severely low at Alqatrun and Adirsiyah. The maximum wind power density was calculated as 137.736 W/m² and 184.134 W/m² at Alqatrun with MLM for 20 m and 60 m elevation. In Adirsiyah these values reach 77.993 W/m² and

101.201 W/m². By the evaluation according to Table 7, the wind power density for 20 m and 60 m altitudes in both Alqatrun and Adirsiyah is below 200 W/m², and the wind class 1 and category were considered weak.

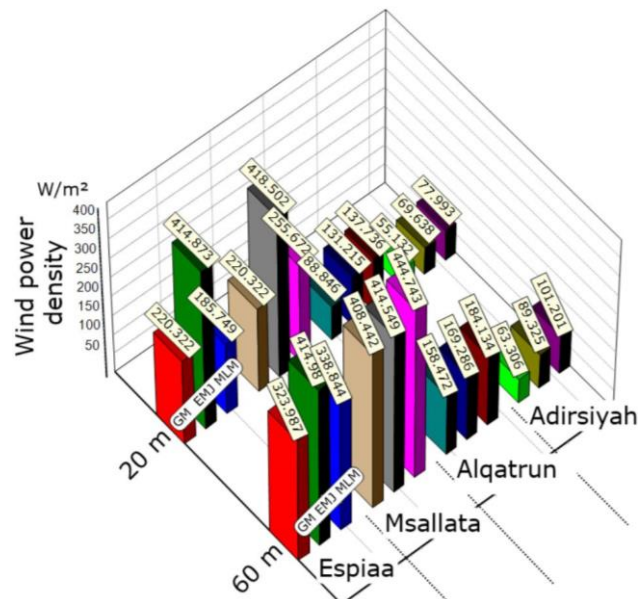


Figure 11. Wind power density at different elevations and locations due to the statistical approximation

5. CONCLUSION

Wind characteristics and wind energy potential of four sites of Libya are Espiaa, Msallata, Alqatrun, and Adirsiyah was assessed statistical Weibull distribution function methods that are GM, EMJ, and MLM. The resulting opinions can be summarized as follows.

- The wind speed distribution is determined by GM and MLM methods showed the best fit with the actual data.
- Statistical error distribution has best-fit performance was determined by GM at Adirsiyah and Espiaa for 20 m elevations. MLM results best fits for Alqatrun and EMJ results for Msallata concerning RMSE, MAE, MBE, and R² criteria. For 60 m elevation EMJ gives the best modeling performance at Adirsiyah and Msallata and MLM at Alqatrun and Espiaa.
- The best wind power potential was determined at Espiaa with 414.98 W/m² power density at 60 m and Msallata with 444.743 W/m².
- The lowest wind power density was determined at Alqatrun and Adirsiyah with peak values of 184.134 W/m² and 101.201 W/m² for 60 m elevation.
- The wind power density of Espiaa is 414.873 W/m² and 418.502 W/m² at Msallata, 137.736 W/m² at Alqatrun, and 77.993 W/m² at Adirsiyah for 20 m elevations.
- The maximum wind power potential was determined at Msallata and the minimum at Adirsiyah.
- When the power density is evaluated, Msallata seems more feasible for wind farm investment compared to other states with a wind power density of 418,502 W/m² and 444.743 W/m² for 20m and 60m altitudes and the wind class is 4 and the category is good.

Future studies that are related to wind energy can investigate wind farm layout optimization, economic feasibility, and environmental impacts to develop wind farm projects.

REFERENCES

- [1] Ansari, M., 2018, "Libyan oil: Prospects for stability and growth", *Apicorp Energy Research*, Vol. 3, No. 14, pp. 1–4.
- [2] Morrow, S., "Blockade will halve Libya oil output: National Oil Co.", <https://www.aa.com.tr/en/energy/oil/blockade-will-halve-libya-oil-output-national-oil-co/29834>, access date: February 18, 2021.
- [3] St John, R.B., 2008, "The changing Libyan economy: Causes and consequences", *The Middle East Journal*, Vol. 62, No. 1, pp. 75–91.
- [4] Khalil, A., Asheibi, A., "The chances and challenges for renewable energy in Libya", 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Palermo, Italy, 1-6, November 22-25, 2015.
- [5] Mrehel, O.G., Gerara Salama, A., "Energy generation potential from wind power in the Southern Libyan Regions", 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA, 548–553, Tripoli, Libya, May 25-27, 2021.
- [6] Elmniifi, M., Alshilmany, M., Abdraba, M., 2018, "Potential of municipal solid waste in Libya for energy utilization", *Open Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–5.
- [7] Kutucu, H., Almryad, A., "Modeling of solar energy potential in Libya using an artificial neural network model", 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), 356–359, Lviv, Ukraine, August 23-27, 2016.
- [8] Belgasim, B., Aldali, Y., Abdunnabi, M.J.R., Hashem, G., Hossin, K., 2018, "The potential of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Libya", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90, pp. 1–15.
- [9] Mohamed, O.A., Masood, S.H., 2018, "A brief overview of solar and wind energy in Libya: Current trends and the future development", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 377, No. 1, 1-12.
- [10] Nassar, Y.F., Salem, M.A., Iessa, K.R., AlShareef, I.M., Ali, K.A., Fakher, M.A., 2021, "Estimation of CO₂ emission factor for the energy industry sector in Libya: a case study", *Environment, Development and Sustainability*, doi: 10.1007/s10668-021-01248-9.
- [11] Mohamed, A.M.A., Al-Habaibeh, A., Abdo, H., 2013, "An investigation into the current utilisation and prospective of renewable energy resources and technologies in Libya", *Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 732–740.
- [12] Mentis, D., Hermann, S., Howells, M., Welsch, M., Siyal, S.H., 2015, "Assessing the technical wind energy potential in Africa a GIS-based approach", *Renewable Energy*, Vol. 83, No. 7, pp. 110–125.
- [13] El-Osta, W., Belhag, M., Klat, M., Fallah, I., Kalifa, Y., 1995, "Wind farm pilot project in Libya", *Renewable Energy*, Vol. 6, No. 5-6, pp. 639–642.
- [14] Kassem, Y., Çamur, H., Aateg, R.A.F., 2020, "Exploring solar and wind energy as a power generation source for solving the electricity crisis in Libya", *Energies*, Vol. 13, No. 14, 3708.
- [15] Schafer, I., "The renewable energy sector and youth employment in Algeria, Libya, Morocco and Tunisia", https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Publications/The_Renewable_Energy_Sector_and_Youth_Employment_in_Algeria_Libya_Morocco_and_Tunisia.pdf, access date: February 18, 2021.
- [16] Elmabruk, A.M., Aleej, F.A., Badii, M.M., "Estimation of wind energy in Libya", 5th International Renewable Energy Congress (IREC), 1-6, Hammamet, Tunisia, March 25-27, 2014.
- [17] Hasan, S.H.A., Guwaeder, A., Gao, W., 2017, "Wind energy assessment of the Zawiyah Region, in northwest Libya", *Energy and Power Engineering*, Vol. 09, No. 06, pp. 325–331.
- [18] Kassem, Y., Çamur, H., AbuGharara, M.A., 2019, "Assessment of wind energy potential for selecting small-scale wind turbines in low wind locations in Libya: A comparative study", *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 12, No. 6, pp. 820–836.

- [19] Elmabruk, A.M., "Estimation of wind energy and wind in some areas (second zone) in Libya", *Ecologic Vehicles, Renewable Energies*, 1–7, Monaco, French, March 26-29, 2009.
- [20] Ali, H.M., Khamiss, R.E., Ahmed, M.Z., "Statistical study and evaluation of six numerical methods to predict wind speed parameters of the Weibull function in Al- Aziziyah, Libya", 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA, 463–467, Tripoli, Libya, May 25-27, 2021.
- [21] Elfarra, M.A., Salem, S., 2018, "Technical and economical evaluation and GHG analysis of wind power generation in four sites using different Weibull parameters", *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 1–12.
- [22] Katsigiannis, Y.A., Stavrakakis, G.S., Pharonides, C., 2013, "Effect of wind turbine classes on the electricity production of wind farms in Cyprus Island", *Conference Papers in Energy*, Vol. 2013, No. 5, pp. 1–6.
- [23] Al-Nassar, W., Alhajraf, S., Al-Enizi, A., Al-Awadhi, L., 2005, "Potential wind power generation in the State of Kuwait", *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 14, pp. 2149–2161.
- [24] Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A.A., Kalantar, V., 2011, "Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 6, pp. 2545–2556.
- [25] Ko, D.H., Jeong, S.T., Kim, Y.C., 2015, "Assessment of wind energy for small-scale wind power in Chuuk State, Micronesia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, No. 4, pp. 613–622.
- [26] Irwanto, M., Gomesh, N., Mamat, M.R., Yusoff, Y.M., 2014, "Assessment of wind power generation potential in Perlis, Malaysia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, pp. 296–308.
- [27] Ahwide, F., Spena, A., El-Kafrawy, A., 2013, "Estimation of electricity generation in Libya using processing technology of wind available data: The case study in Derna", *APCBEE Procedia*, Vol. 5, No. 2–3, pp. 451–467.
- [28] Kassem, Y., Gökçekus, H., Faraj, R.A., 2019, "Evaluation of the wind energy potential in Libya's Eastern Mediterranean Coast area using Weibull Distribution Function", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 14, No. 10, pp. 2483–2491.
- [29] Artigao, E., Viguera-Rodríguez, A., Honrubia-Escribano, A., Martín-Martínez, S., Gómez-Lázaro, E., 2021, "Wind resource and wind power generation assessment for education in engineering", *Sustainability*, Vol. 13, No. 5, 2444.
- [30] Irwin, J.S., 1979, "A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability", *Atmospheric Environment*, Vol. 13, pp. 191–194.
- [31] Chaurasiya, P.K., Ahmed, S., Warudkar, V., 2018, "Study of different parameters estimation methods of Weibull distribution to determine wind power density using ground-based Doppler SODAR instrument", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, No. 4, pp. 2299–2311.
- [32] Aririguzo, J.C., Ekwe, E.B., 2019, "Weibull distribution analysis of wind energy prospect for Umudike, Nigeria for power generation", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 55, pp. 160–163.
- [33] Hulio, Z.H., Jiang, W., Rehman, S., 2019, "Techno - Economic assessment of wind power potential of Hawke's Bay using Weibull parameter: A review", *Energy Strategy Reviews*, Vol. 26, 100375.
- [34] Saeed, M.A., Ahmed, Z., Yang, J., Zhang, W., 2020, "An optimal approach of wind power assessment using Chebyshev metric for determining the Weibull distribution parameters", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 37, 100612.
- [35] Fazelpour, F., Markarian, E., Soltani, N., 2017, "Wind energy potential and economic assessment of four locations in Sistan and Balouchestan province in Iran", *Renewable Energy*, Vol. 109, Part A, pp. 646–667.
- [36] Kaoga, D.K., Danwe, R., Yamigno, S.D., Djongyang, N., 2015, "Performance analysis of methods for estimating Weibull Parameters for wind speed distribution in the district of Maroua", *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, Vol. 6, No. 2, pp. 153-174.

- [37] Ouahabi, M.H., Elkhachine, H., Benabdelouahab, F., Khamlichi, A., 2020, "Comparative study of five different methods of adjustment by the Weibull model to determine the most accurate method of analyzing annual variations of wind energy in Tetouan - Morocco", *Procedia Manufacturing*, Vol. 46, pp. 698–707.
- [38] Akdag, S.A., Dinler, A., 2009, "A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications", *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 7, pp. 1761–1766.
- [39] Tiam Kapen, P., Jeutho Gouajio, M., Yemélé, D., 2020, "Analysis and efficient comparison of ten numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy potential: Application to the city of Bafoussam, Cameroon", *Renewable Energy*, Vol. 159, No. 2, pp. 1188–1198.
- [40] Saeed, M.A., Ahmed, Z., Zhang, W., 2020, "Wind energy potential and economic analysis with a comparison of different methods for determining the optimal distribution parameters", *Renewable Energy*, Vol. 161, pp. 1092–1109.
- [41] Wen, Y., Kamranzad, B., Lin, P., 2021, "Assessment of long-term offshore wind energy potential in the south and southeast coasts of China based on a 55-year dataset", *Energy*, Vol. 224, 120225.
- [42] Cengel, Y.A., Boles, M.A., 2007, *Thermodynamics: An engineering approach sixth ed.*, McGraw-Hill, Singapore.
- [43] Oner, Y., Ozcira, S., Bekiroglu, N., Senol, I., 2013, "A comparative analysis of wind power density prediction methods for Çanakkale, Intepe region, Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23, No. 9, pp. 491–502.
- [44] Kumar, K.S.P., Gaddada, S., 2015, "Statistical scrutiny of Weibull parameters for wind energy potential appraisal in the area of northern Ethiopia", *Renewables: Wind, Water, and Solar*, Vol. 2, No. 14, pp. 1-15.
- [45] Ko, D.H., Jeong, S.T., Kang, K.S., 2015, "Assessment of offshore wind power potential in the western seas of Korea", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 27, No. 4, pp. 266–273.



MORPHOLOGICAL, TEXTURAL AND THERMAL PROPERTIES OF LOW-COST SILICA AEROGEL COMPOSITES

¹Gülcihan GÜZEL KAYA , ²Hüseyin DEVECİ 

Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Chemical Engineering Department,
Konya, TURKEY

¹ggkaya@ktun.edu.tr, ²hdeveci@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 10.07.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.08.2021)

ABSTRACT: Nowadays, silica aerogels with promising properties have gained interest in many fields. To enhance properties of the silica aerogels and reduce material cost, many approaches such as preparation of silica aerogels composites using low-cost precursors rich in silica have been developed. In this study, polyethylene glycol (PEG)/silica and carbon black (CB)/silica aerogel composites were easily prepared by sol-gel method. Morphological properties of the composites were investigated by field emission scanning electron microscopy (FESEM) analysis. PEG and CB incorporation improved textural properties of the silica aerogel. Specific surface area of the silica aerogel was increased from 477 m²/g to 541 m²/g and 553 m²/g with the addition of PEG and CB, respectively. Moreover, silica aerogel composites showed higher pore volume and pore size than silica aerogel. It was determined that CB/silica aerogel composite exhibited the highest thermal stability. Thermal conductivity of the silica aerogel (0.035 W/m K) slightly increased with PEG and CB addition highly depending on bulk density. The bulk density of PEG/silica and CB/silica aerogel composites was specified as 0.048 g/cm³ and 0.067 g/cm³, respectively. The obtained results showed that silica aerogel composites with hopeful properties can be used in many applications.

Key Words: Silica aerogel, Composite material, Morphological properties, Textural properties, Thermal properties

Düşük Maliyetli Silika Aerojel Kompozitlerin Morfolojik, Yapısal ve Termal Özellikleri

ÖZ: Silika aerojeller günümüzde umut vadeden özellikleriyle birçok alanda ilgi görmektedir. Silika aerojellerin özelliklerini geliştirmek ve malzeme maliyetini azaltmak amacıyla yüksek oranda silika içeren ucuz malzemelerden silika aerojel kompozitlerin hazırlanması gibi yaklaşımlar geliştirilmektedir. Bu çalışmada sol-jel metodu kullanılarak polietilen glikol (PEG)/silika ve karbon siyahı (CB)/silika aerojel kompozitler kolayca hazırlanmıştır. Kompozitlerin morfolojik özellikleri alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) analizi ile incelenmiştir. PEG ve CB ilavesinin, silika aerojelin yapısal özellikleri üzerinde olumlu etkileri olmuştur. PEG ve CB ilavesiyle silika aerojelin spesifik yüzey alanı 477 m²/g'den sırasıyla 541 m²/g ve 553 m²/g'ye artmıştır. Ayrıca silika aerojel kompozitler, silika aerojelden daha yüksek gözenek hacmi ve gözenek boyutu göstermiştir. En yüksek termal kararlılığı CB/silika aerojel kompozitin gösterdiği belirlenmiştir. Malzemelerin yoğunluğuna bağlı olarak PEG ve CB ilavesiyle silika aerojelin termal iletkenliği (0.035 W/m K) kısmen artmıştır. PEG/silika ve CB/silika aerojel kompozitlerin yoğunluğu sırasıyla 0.048 g/cm³ ve 0.067 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar silika aerojel kompozitlerin sahip oldukları olumlu özellikleri sayesinde birçok uygulamada kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Silika aerojel, Kompozit malzeme, Morfolojik özellikler, Yapısal özellikler, Termal özellikler

1. INTRODUCTION

Silica aerogels are porous materials which have interconnected structure with air filled pores (Talebi et al., 2019). Silica aerogels exhibit many unique properties such as porous structure, low density, high thermal resistance, low thermal conductivity, and so on (Liu et al., 2016; Nazeran and Moghaddas, 2017). These advantages make silica aerogels potential materials in various fields including thermal and acoustic insulation, automotive, electronics, sensors, gas capture and liquid adsorption/absorption processes, catalysts, and biomedical applications (Iswar et al., 2017; Maleki et al., 2016; Pisal and Rao, 2016; Wu et al., 2012). However, their poor mechanical strength, brittleness, hydrophilicity, and high-cost restrict their utilization in large-scale applications (Choi et al., 2020; Rezaei et al., 2020).

Silica aerogel composites have been prepared by the combination of silica aerogel and different types of additives (metals, metal oxides, polymers, carbon-based materials, and porogen materials) to improve current properties of silica aerogels or gain new properties to silica aerogels (Acosta-Rangel et al., 2018; Gurav et al., 2010). For example, some metals like Fe and La increase specific surface area of silica aerogels leading to higher efficiency in adsorption and photocatalytic processes (Hernandez-Campos et al., 2018). Usage of Ag, Au and Pd enhances chemical stability of silica aerogels that provides many advantages in optical and biomedical applications (Krylova et al., 2009). To change electrical, optical, magnetic and catalytic properties of silica aerogels, metal oxides (TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO, ZnO, etc.) are commonly used (Casula et al., 2011; Mo et al., 1998; Popovici et al., 2004; Zhu et al., 2009). Mechanical properties of silica aerogels are improved with the addition of thermoplastic/thermoset polymers such as epoxy, polystyrene, polyester, nylon-6, and so on (Abdul Halim et al., 2017; Ge et al., 2009; Ilhan et al., 2006; Krishnaswamy et al., 2017). Carbon-based materials (carbon nanotube, graphene oxide and carbon black) significantly affect optical properties of silica aerogels (Zhao et al., 2013). Porogen materials including polyvinyl alcohol and glycerol have synergistic effects on the porous structure of silica aerogels. Silica aerogel composites with high surface area and controllable pore size are obtained using these materials (Durães et al., 2015; Kim et al., 2015).

Silica aerogel composites can be easily prepared by the sol-gel method which consists of gelation, aging and drying steps. Additives can be added into silica sol before gelation or diffused/adsorbed to silica gel before drying step (Sachithanadam and Chandrakant Joshi, 2016). In the formation of silica sol, conventional silicon alkoxides which are expensive and hazardous chemicals are generally preferred (Zinzi et al., 2019). However, recently, inorganic/organic waste and industrial by-products have been used as silica precursor that reduces material cost as well as waste accumulation leading to prevent environmental pollution (Guzel Kaya and Deveci, 2020a; Nazriati et al., 2014). In the formation of silica sol from these low-cost materials rich in silica, sodium silicate solution is first obtained by the alkali extraction method. Gelation is initiated with the addition of acid to the sodium silicate solution at optimum pH value (Affandi et al., 2009; Guzel Kaya et al., 2020; Shi et al., 2010). The gel is strengthened in different types of solvents such as alcohols, acetone, water, and ionic liquids. In the presence of solvents with low vapor pressure, highly porous silica aerogel network can be synthesized owing to a decrease in shrinkage of the silica gel (Aegerter et al., 2011). In the last step, solvents or water in the gel structure are removed by supercritical drying (Guzel Kaya and Deveci, 2020b). Supercritical drying is an effective method in which no liquid-vapor interface is observed. This method provides the preservation of the pore structure of the material with decreasing capillary stresses. CO_2 , which has low critical temperature, is widely used as a solvent in supercritical drying process (Aravind et al., 2010; Goksu et al., 2010).

Volcanic tuff, which is a low-cost material rich in silica (71.5%), was utilized as a silica precursor in this work. With the addition of polyethylene glycol (PEG) and carbon black (CB) into the silica sol before gelation, composites were prepared. The effects of PEG and CB addition on the surface morphology, porous structure and thermal behaviour of the silica aerogel were investigated. The properties of the composites were compared with those of the neat silica aerogel and literature studies.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Materials

Volcanic tuff (14.0% Al_2O_3 , 71.5% SiO_2 , 4.2% K_2O , 4.8% Na_2O , 1.3% CaO , 2.8% Fe_2O_3 , 0.5% MgO , 0.5% TiO_2 , 0.1% MnO and 0.3% P_2O_5) was supplied from Kayseri Region, Turkey. NaOH ($\geq 97\%$) and HCl (37%) were purchased from Sigma-Aldrich. Isopropanol ($\geq 99.8\%$, Merck) and *n*-hexane (98.5%, Merck) were obtained as aging and washing solvents, respectively. PEG-400 (Merck) and CB (particle size $< 45 \mu\text{m}$) were evaluated as additives in the preparation of silica aerogel composites. All chemicals were used without further purification. In the solution preparation and aging step, distilled water was used.

2.2. Preparation of silica aerogel composites

Synthesis of silica aerogel was conducted using the sol-gel method as shown in Figure 1. Firstly, acid treatment was applied to remove impurities from volcanic tuff through mixing volcanic tuff and 3 M HCl at 60°C for 1.5 h. The tuff was washed with water, and then dried at 70°C . After the extraction process in which the tuff and 3 M NaOH were mixed under the reflux for 5 h, obtained Na_2SiO_3 solution was filtered. Gelation was initiated with adding 3 M HCl solution to Na_2SiO_3 solution and formation of silica gel was observed at about pH 10. The gel was aged in the mixture of isopropanol/water (equal volume) at 50°C for 1 day following the aging in isopropanol in the same conditions. To remove impurities and solvent from the silica gel, the gel was washed with *n*-hexane. Lastly, solvents or water were removed from the gel by CO_2 supercritical drying (in two steps: (1) 100 bar, 50°C , 1.5 L/min CO_2 , 30 min and (2) 100 bar, 50°C , 3.0 L/min CO_2 , 2 h).

In the preparation of silica aerogel composites, same procedure was performed (Figure 1). With the addition of PEG or CB to the Na_2SiO_3 solution before gelation, silica aerogel composites were obtained. PEG/silica and CB/silica aerogel composites were prepared using 10 wt% PEG and 0.33 wt% CB, respectively.

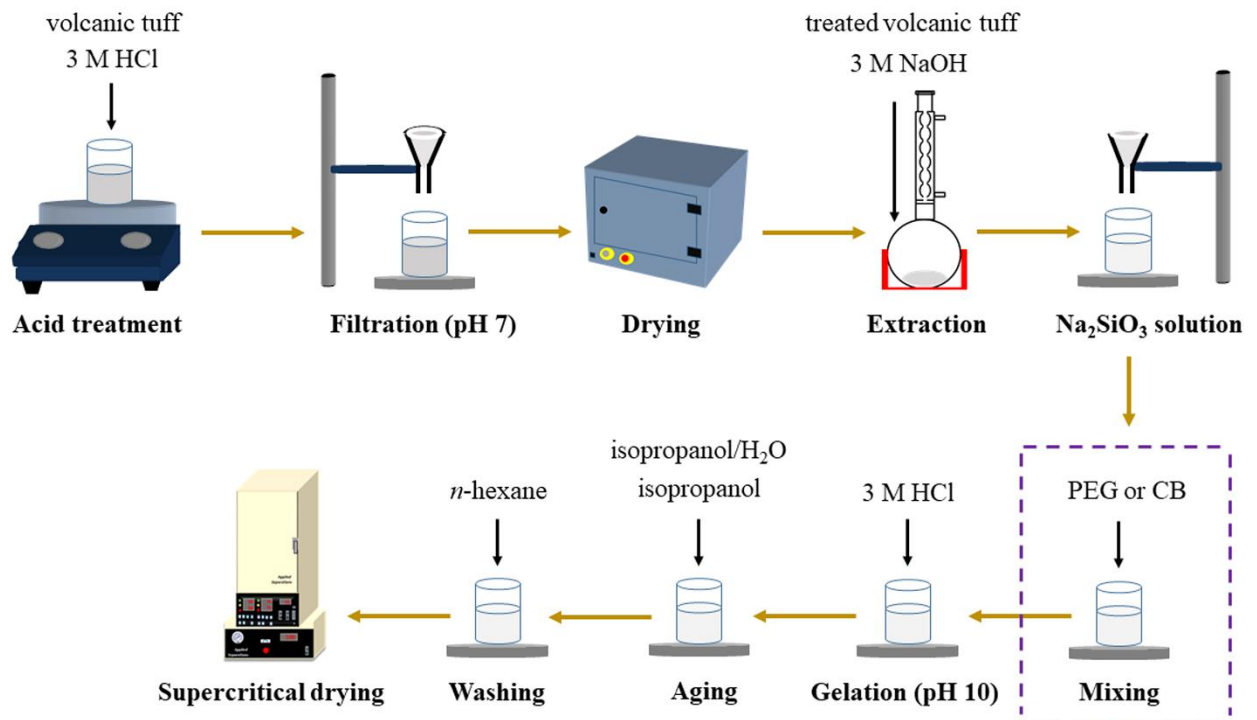


Figure 1. Preparation procedure of silica aerogel composites

2.3. Characterization of silica aerogel composites

X-ray diffraction (XRD) patterns of the samples were obtained using X-ray diffractometer (Bruker D8 Advanced, 40 kV, 40 mA, Cu K α radiation). Fourier transform infrared (FT-IR) data was collected to analyze chemical bonds of the samples by FT-IR spectrometer (Bruker Vertex 70). N₂ adsorption-desorption measurements were conducted to examine textural properties of the samples by Micromeritics Tristar II 3020 analyzer. Numerical values were calculated from the isotherm data with Brunauer-Emmett-Teller (BET) and Barrett-Joyner-Halende (BJH) methods. Morphological characterization of the samples was conducted by field emission scanning electron microscopy (FESEM) analyses (TESCAN MAIA3 XMU). Thermogravimetric analyses (TGA) were carried out using thermal analyzer (METTLER STAR SW, N₂ atmosphere (flow rate of 30 mL/min), heating rate of 10 °C/min). Thermal conductivity of the samples was determined using C-THERM thermal conductivity analyzer and average value was calculated through five times repeated measurements. Bulk density of the samples was recorded as mass of sample divided by volume.

3. RESULTS AND DISCUSSION

XRD patterns of the samples are shown in Figure 2a. The peak ($2\theta = \sim 22^\circ$) indicated preparation of amorphous materials (Jaiboon et al., 2014). There was no peak belonging to any impurities or NaCl owing to advantages of supercritical drying process. It is known that Na⁺ ions in the material pores cause surface tension resulting in shrinkage of the materials (Hu et al., 2016). However, Na⁺ ions were easily removed from the sample pores by preventing pore collapse related to surface tension in this study.

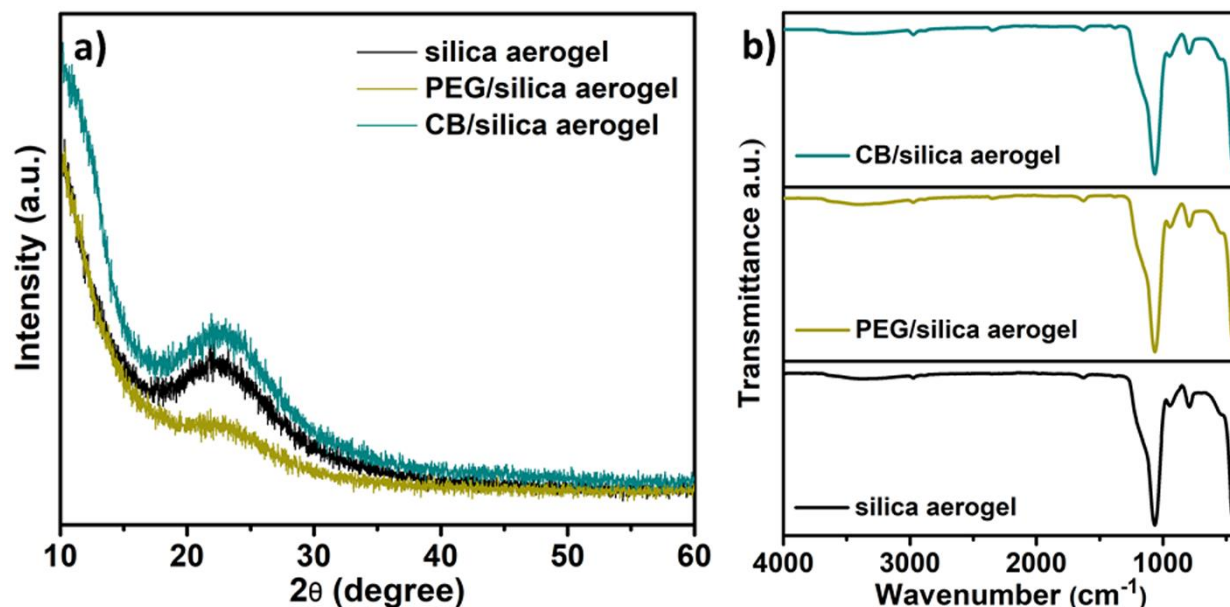


Figure 2. a) XRD patterns and b) FT-IR spectra of the samples

FT-IR spectra of the samples are shown in Figure 2b. It was obvious that the silica aerogel and its composites were successfully prepared from the tuff. The peaks belonging to characteristic Si-O-Si symmetric and asymmetric stretching vibrations of the silica aerogel were specified at 790 cm^{-1} and 1070 cm^{-1} , respectively. At 450 cm^{-1} , the peak contributed to Si-O-Si bending vibrations was observed (Al-Oweini and El-Rassy, 2009). The peaks with low intensity at 670 cm^{-1} and 940 cm^{-1} were attributed to Si-OH stretching vibrations (Liu et al., 2020). The band centered at 3400 cm^{-1} indicated -OH stretching vibrations. Moreover, the peak related to water molecules on the material surface appeared at 1632 cm^{-1} (Zhang et al., 2017).

There was no significant effect of PEG or CB addition on the FT-IR spectrum of the silica aerogel depending on low amount of additives. The peak C-O-C bonds of PEG molecules at 1100 cm^{-1} could not be stated due to the high intensity of peak at 1070 cm^{-1} (Durães et al., 2015). The intensity of the band at about 3400 cm^{-1} increased slightly which can be explained with -OH groups of PEG in the FT-IR spectrum of PEG/silica aerogel composite. However, CB addition slightly decreased the intensity of the band.

N_2 adsorption-desorption isotherms of the samples are shown in Figure 3 and related results are given in Table 1. The silica aerogel and silica aerogel composites presented type IV isotherm that indicates formation of mesoporous materials (Allothman, 2012). Moreover, the materials are defined as microporous materials ($< 2\text{ nm}$), mesoporous materials (between 2 nm and 50 nm), and macroporous materials ($> 50\text{ nm}$) depending on pore size (Perego and Millini, 2013). It can be said that the samples obtained in this study were mesoporous materials.

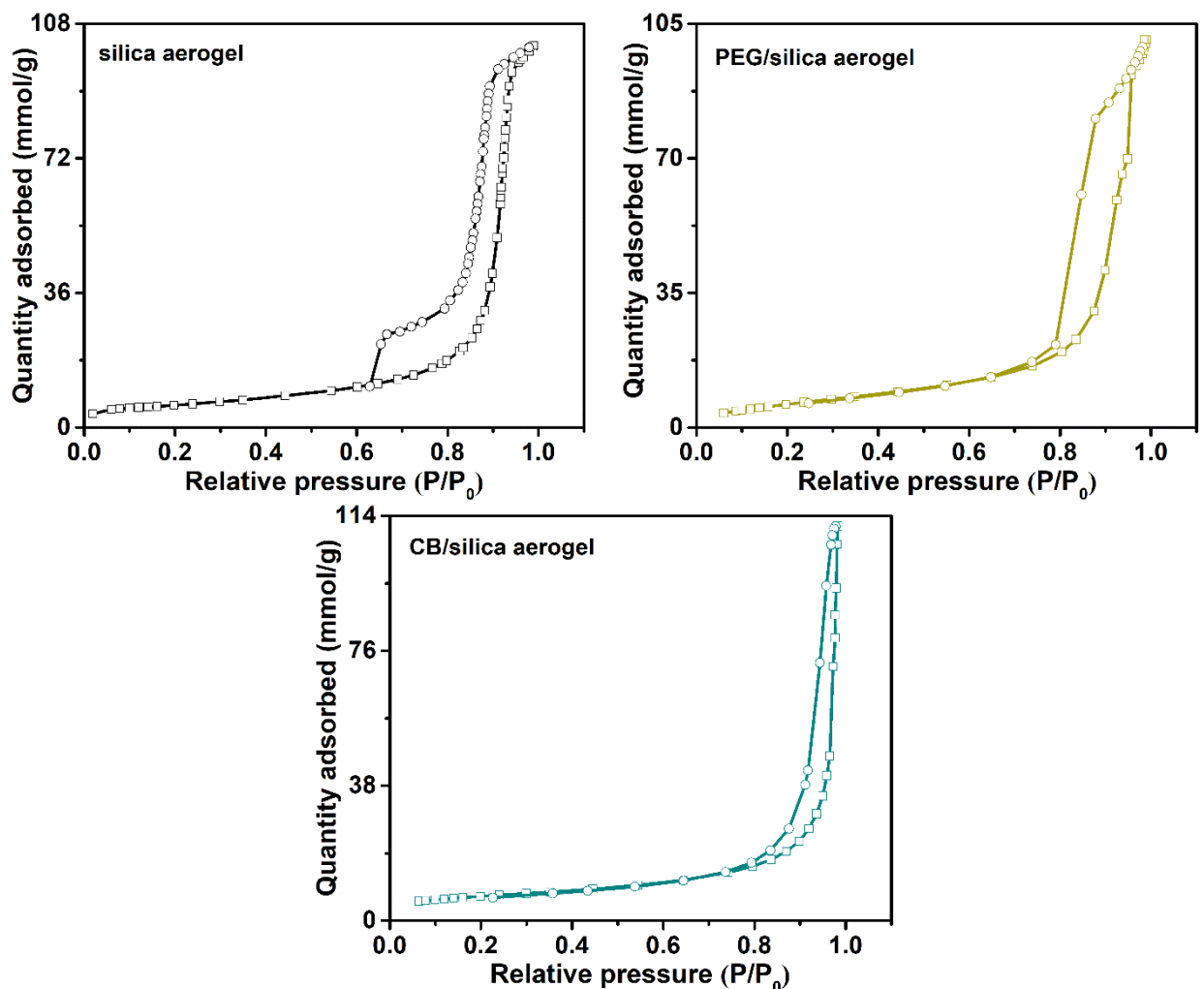


Figure 3. N_2 adsorption-desorption isotherms of the samples

The specific surface area of the silica aerogel was specified as $477\text{ m}^2/\text{g}$. PEG and CB incorporation into the silica network provided synergistic effects on textural properties of the silica aerogel. The specific surface area of PEG/silica and CB/silica aerogel composite was determined as $541\text{ m}^2/\text{g}$ and $553\text{ m}^2/\text{g}$, respectively. When compared to literature studies as given Table 2, the silica aerogel composites prepared from volcanic tuff exhibited higher specific surface area than that of the some conventional silicon alkoxides and other materials rich in silica. The pore volume and pore size of the silica aerogel were considerably increased with the addition of PEG and CB. It is known that optimum amount of

porogen materials can increase surface area of the materials and change pore structure.

Table 1. Textural and physical properties of the samples

Properties	silica aerogel	PEG/silica aerogel	CB/silica aerogel
Specific surface area (m ² /g)	477	541	553
Average pore size (nm)	19	21	24
Pore volume (cm ³ /g)	2.76	2.81	3.33
Bulk density (g/cm ³)	0.036	0.048	0.067
Thermal conductivity (W/m K)	0.035	0.041	0.043

Table 2. Textural properties of silica aerogels synthesized from different precursors in literature studies

Precursor	Specific surface area (m ² /g)	Average pore Size (nm)	Pore volume (cm ³ /g)
Wheat starch (Ubeyitogullari and Ciftci, 2016)	59	22.0	0.24
Bagasse ash (Nazriati et al., 2014)	441	3.8	0.75
Rice hull ash (Li and Wang, 2008)	499	26.5	3.31
Fly ash (Shi et al., 2010)	362	10.4	0.95
Kaolin (Hu et al., 2016)	465	20.0	2.70
Oil shale ash (Gao et al., 2010b)	789	14.1	2.77
Methyltrimethoxysilane (Durães et al., 2012)	232	37.0	-

FESEM images of the samples are shown in Figure 4. Silica aerogel composites presented similar surface morphology with the silica aerogel. It was obvious that the samples had interconnected structure including pores. PEG/silica and CB/silica aerogel composites exhibited more porous structure when compared to the neat silica aerogel, which was supported with N₂ adsorption-desorption isotherms. Furthermore, in the presence of PEG and CB, more homogeneous dispersion of particles was observed.

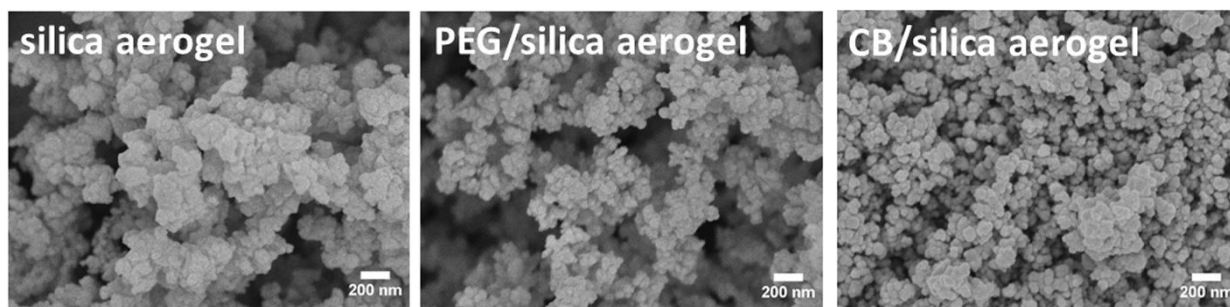


Figure 4. FESEM images of the samples

TGA curves of the samples are shown in Figure 5. Thermal decomposition of the samples occurred in three steps. Initially, removal of water molecules and solvents from the materials resulted in mass loss. Organics belonged to silica network started to decompose in the second step (200 - 600 °C). At high temperatures, the samples preserved most of the residual mass. The residue of the silica aerogel at 800 °C was approximately 87% that indicated high thermal stability of the sample. Higher mass loss was determined in the presence of PEG, which can be attributed to lower decomposition temperature of PEG molecules (Suchithra et al., 2012). In contrast to PEG, CB incorporation into the silica network increased thermal stability of the silica aerogel depending on high thermal stability of the CB particles.

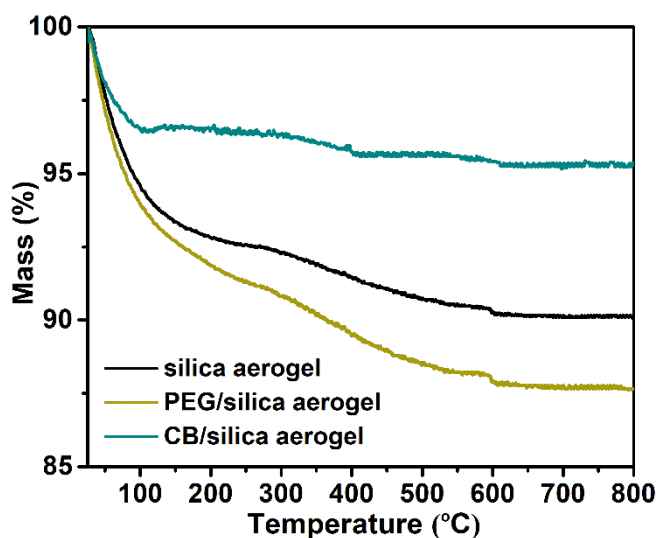


Figure 5. TGA curves of the samples

Thermal conductivity of amorphous materials is very low due to the phonon scattering resulted from disorder in atomic structure of the materials. And also, porosity of the materials significantly affects their thermal conductivity. High porosity generally decreases thermal conductivity of the materials with restricting heat conduction through the material (Lei et al., 2017a; Lei et al., 2017b). Moreover, thermal conductivity of the materials is directly associated with their bulk density. It is known that materials with low density decrease thermal conductivity. It can be explained with less solid content of the materials that makes difficult heat conduction (Jain et al., 2002). In this study, the silica aerogel had considerably low thermal conductivity (0.035 W/m K) as shown in Table 1. With the addition of PEG and CB, thermal conductivity of the silica aerogel slightly increased. In spite of formation of silica aerogel composites with high pore volume, slight increase in thermal conductivity was observed depending on higher bulk density of the composites. The bulk density of PEG/silica and CB/silica aerogel composite was determined as 0.048 g/cm³ and 0.067 g/cm³, respectively. Although silica aerogel composites presented higher bulk density than silica aerogel, the samples still are better when compared to silica aerogels in literature studies (from wheat starch (0.29 g/cm³), rice hull ash (0.33 g/cm³), oil shale ash (0.077 g/cm³), sodium silicate (0.084 g/cm³), tetraethylorthosilicate (0.097 g/cm³)) (Bangi et al., 2008; Gao et al., 2010a; Hilonga et al., 2009; Li and Wang, 2008; Ubeyitogullari and Ciftci, 2016).

4. CONCLUSION

Silica aerogel was synthesized with the utilization of low-cost precursor. With the incorporation of PEG and CB into the silica network, PEG/silica and CB/silica aerogel composites were successfully prepared. Amorphous structure of the composites was revealed by XRD analyses. Mesoporous structure of the composites was shown with N₂ adsorption-desorption measurements and morphological characterization. Textural properties of the silica aerogel were improved in the presence of PEG and CB. According to TGA results, highest thermal stability was belonged to CB/silica aerogel composite. Thermal conductivity and bulk density of the composites were slightly higher than that of the silica aerogel that not makes the composites unfavorable materials. The composites still had advantages when compared to many silica aerogels synthesized from conventional silicon alkoxides, organic/inorganic waste, industrial by-products, and so on. The results show that low-cost silica aerogel composites with promising characteristics can find many application fields to be used such as gas capture, adsorption/absorption processes, sensors, drug delivery, antibacterial applications, *etc.*

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge TUBITAK for 2211-E Direct PhD Scholarship Program, Academic Staff Training Program (2016-ÖYP-071) and Konya Technical University.

REFERENCES

- Abdul Halim, Z. A., Mat Yajid, M. A., Idris, M. H., Hamdan, H., 2017, "Effects of silica aerogel particle sizes on the thermal–mechanical properties of silica aerogel – unsaturated polyester composites", *Plastics, Rubber and Composites*, 46, 184-192.
- Acosta-Rangel, A., Sánchez-Polo, M., Polo, A. M. S., Rivera-Utrilla, J., Berber-Mendoza, M. S., 2018, "Tinidazole degradation assisted by solar radiation and iron-doped silica xerogels", *Chemical Engineering Journal*, 344, 21-33.
- Aegerter, M. A., Leventis, N., Koebel, M. M., 2011, "Aerogels Handbook", *Springer*, London, 118-119.
- Affandi, S., Setyawan, H., Winardi, S., Purwanto, A., Balgis, R., 2009, "A facile method for production of high-purity silica xerogels from bagasse ash", *Advanced Powder Technology*, 20, 468-472.
- Al-Oweini, R., El-Rassy, H., 2009, "Synthesis and characterization by FTIR spectroscopy of silica aerogels prepared using several $\text{Si}(\text{OR})_4$ and $\text{R}'\text{Si}(\text{OR})_3$ precursors", *Journal of Molecular Structure*, 919, 140-145.
- Alothman, Z., 2012, "A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials", *Materials*, 5, 2874-2902.
- Aravind, P. R., Shajesh, P., Soraru, G. D., Warriar, K. G. K., 2010, "Ambient pressure drying: a successful approach for the preparation of silica and silica based mixed oxide aerogels", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 54, 105-117.
- Bangi, U. K., Venkateswara Rao, A., Parvathy Rao, A., 2008, "A new route for preparation of sodium-silicate-based hydrophobic silica aerogels via ambient-pressure drying", *Science and Technology of Advanced Materials*, 9, 035006.
- Casula, M. F., Corrias, A., Paschina, G., 2011, "Nickel oxide–silica and nickel–silica aerogel and xerogel nanocomposite materials", *Journal of Materials Research*, 15, 2187-2194.
- Choi, H., Parale, V. G., Kim, T., Choi, Y.-S., Tae, J., Park, H.-H., 2020, "Structural and mechanical properties of hybrid silica aerogel formed using triethoxy(1-phenylethenyl)silane", *Microporous and Mesoporous Materials*, 298, 110092.
- Durães, L., Maia, A., Portugal, A., 2015, "Effect of additives on the properties of silica based aerogels synthesized from methyltrimethoxysilane (MTMS)", *The Journal of Supercritical Fluids*, 106, 85-92.
- Durães, L., Ochoa, M., Rocha, N., Patrício, R., Duarte, N., Redondo, V., et al., 2012, "Effect of the Drying Conditions on the Microstructure of Silica Based Xerogels and Aerogels", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12, 6828-6834.
- Gao, G.-M., Liu, D.-R., Zou, H.-F., Zou, L.-C., Gan, S.-C., 2010a, "Preparation of silica aerogel from oil shale ash by fluidized bed drying", *Powder Technology*, 197, 283-287.
- Gao, G.-M., Xu, X.-C., Zou, H.-F., Ji, G.-J., Gan, S.-C., 2010b, "Microstructural and physical properties of silica aerogels based on oil shale ash", *Powder Technology*, 202, 137-142.
- Ge, D., Yang, L., Li, Y., Zhao, J., 2009, "Hydrophobic and thermal insulation properties of silica aerogel/epoxy composite", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355, 2610-2615.
- Goksu, E. I., Hoopes, M. I., Nellis, B. A., Xing, C., Faller, R., Frank, C. W., et al., 2010, "Silica xerogel/aerogel-supported lipid bilayers: consequences of surface corrugation", *Biochimica et Biophysica Acta*, 1798, 719-29.
- Gurav, J. L., Jung, I.-K., Park, H.-H., Kang, E. S., Nadargi, D. Y., 2010, "Silica Aerogel: Synthesis and Applications", *Journal of Nanomaterials*, 2010, 1-11.
- Guzel Kaya, G., Deveci, H., 2020a, "Effect of Aging Solvents on Physicochemical and Thermal Properties of Silica Xerogels Derived from Steel Slag", *ChemistrySelect*, 5, 1586-1591.

- Guzel Kaya, G., Deveci, H., 2020b, "Synergistic effects of silica aerogels/xerogels on properties of polymer composites: A review", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 13-27.
- Guzel Kaya, G., Yilmaz, E., Deveci, H., 2020, "Synthesis of sustainable silica xerogels/aerogels using inexpensive steel slag and bean pod ash: A comparison study", *Advanced Powder Technology*, 31, 926-936.
- Hernandez-Campos, M., Polo, A. M. S., Sanchez-Polo, M., Rivera-Utrilla, J., Berber-Mendoza, M. S., Andrade-Espinosa, G., et al., 2018, "Lanthanum-doped silica xerogels for the removal of fluorides from waters", *Journal of Environmental Management*, 213, 549-554.
- Hilonga, A., Kim, J.-K., Sarawade, P. B., Kim, H. T., 2009, "Low-density TEOS-based silica aerogels prepared at ambient pressure using isopropanol as the preparative solvent", *Journal of Alloys and Compounds*, 487, 744-750.
- Hu, W., Li, M., Chen, W., Zhang, N., Li, B., Wang, M., et al., 2016, "Preparation of hydrophobic silica aerogel with kaolin dried at ambient pressure", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 501, 83-91.
- Ilhan, F., Fabrizio, E. F., McCorkle, L., Scheiman, D. A., Dass, A., Palczer, A., et al., 2006, "Hydrophobic monolithic aerogels by nanocasting polystyrene on amine-modified silica", *Journal of Materials Chemistry*, 16, 3046.
- Iswar, S., Malfait, W. J., Balog, S., Winnefeld, F., Lattuada, M., Koebel, M. M., 2017, "Effect of aging on silica aerogel properties", *Microporous and Mesoporous Materials*, 241, 293-302.
- Jaiboon, V., Yoosuk, B., Prasassarakich, P., 2014, "Amine modified silica xerogel for H₂S removal at low temperature", *Fuel Processing Technology*, 128, 276-282.
- Jain, A., Rogojevic, S., Ponoth, S., Gill, W. N., Plawsky, J. L., Simonyi, E., et al., 2002, "Processing dependent thermal conductivity of nanoporous silica xerogel films", *Journal of Applied Physics*, 91, 3275-3281.
- Kim, H. M., Noh, Y. J., Yu, J., Kim, S. Y., Youn, J. R., 2015, "Silica aerogel/polyvinyl alcohol (PVA) insulation composites with preserved aerogel pores using interfaces between the superhydrophobic aerogel and hydrophilic PVA solution", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 75, 39-45.
- Krishnaswamy, S., Tinsley, L., Marchante, V., Addepalli, S., Huang, Z., Abhyankar, H., 2017, "Effect of extrusion and compression moulding on the thermal properties of nylon-6/silica aerogel composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31, 992-1009.
- Krylova, G. V., Gnatyuk, Y. I., Smirnova, N. P., Eremenko, A. M., Gun'ko, V. M., 2009, "Ag nanoparticles deposited onto silica, titania, and zirconia mesoporous films synthesized by sol-gel template method", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 50, 216-228.
- Lei, Y., Chen, X., Hu, Z., Song, H., Cao, B., 2017a, "A general strategy for improving the thermal insulation performance of aerogels by multiple impregnation", *Scripta Materialia*, 139, 5-8.
- Lei, Y., Hu, Z., Cao, B., Chen, X., Song, H., 2017b, "Enhancements of thermal insulation and mechanical property of silica aerogel monoliths by mixing graphene oxide", *Materials Chemistry and Physics*, 187, 183-190.
- Li, T., Wang, T., 2008, "Preparation of silica aerogel from rice hull ash by drying at atmospheric pressure", *Materials Chemistry and Physics*, 112, 398-401.
- Liu, H., Chu, P., Li, H., Zhang, H., Li, J., 2016, "Novel three-dimensional halloysite nanotubes/silica composite aerogels with enhanced mechanical strength and low thermal conductivity prepared at ambient pressure", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 80, 651-659.
- Liu, P., Gao, H., Chen, X., Chen, D., Lv, J., Han, M., et al., 2020, "In situ one-step construction of monolithic silica aerogel-based composite phase change materials for thermal protection", *Composites Part B: Engineering*, 195, 108072.
- Maleki, H., Durães, L., García-González, C. A., del Gaudio, P., Portugal, A., Mahmoudi, M., 2016, "Synthesis and biomedical applications of aerogels: Possibilities and challenges", *Advances in Colloid and Interface Science*, 236, 1-27.

- Mo, C. M., Li, Y. H., Liu, Y. S., Zhang, Y., Zhang, L. D., 1998, "Enhancement effect of photoluminescence in assemblies of nano-ZnO particles/silica aerogels", *Journal of Applied Physics*, 83, 4389-4391.
- Nazeran, N., Moghaddas, J., 2017, "Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 461, 1-11.
- Nazriati, N., Setyawan, H., Affandi, S., Yuwana, M., Winardi, S., 2014, "Using bagasse ash as a silica source when preparing silica aerogels via ambient pressure drying", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 400, 6-11.
- Perego, C., Millini, R., 2013, "Porous materials in catalysis: challenges for mesoporous materials", *Chemical Society Reviews*, 42, 3956-76.
- Pisal, A. A., Rao, A. V., 2016, "Comparative studies on the physical properties of TEOS, TMOS and Na₂SiO₃ based silica aerogels by ambient pressure drying method", *Journal of Porous Materials*, 23, 1547-1556.
- Popovici, M., Gich, M., Roig, A., Casas, L., Molins, E., Savii, C., et al., 2004, "Ultraporous Single Phase Iron Oxide-Silica Nanostructured Aerogels from Ferrous Precursors", *Langmuir*, 20, 1425-1429.
- Rezaei, S., Zolali, A. M., Jalali, A., Park, C. B., 2020, "Novel and simple design of nanostructured, super-insulative and flexible hybrid silica aerogel with a new macromolecular polyether-based precursor", *Journal of Colloid and Interface Science*, 561, 890-901.
- Sachithanadam, M., Chandrakant Joshi, S., 2016, "Silica Aerogel Composites", *Springer*, Singapore, 15-17.
- Shi, F., Liu, J.-X., Song, K., Wang, Z.-Y., 2010, "Cost-effective synthesis of silica aerogels from fly ash via ambient pressure drying", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356, 2241-2246.
- Suchithra, P. S., Vazhayal, L., Peer Mohamed, A., Ananthakumar, S., 2012, "Mesoporous organic-inorganic hybrid aerogels through ultrasonic assisted sol-gel intercalation of silica-PEG in bentonite for effective removal of dyes, volatile organic pollutants and petroleum products from aqueous solution", *Chemical Engineering Journal*, 200-202, 589-600.
- Talebi, Z., Soltani, P., Habibi, N., Latifi, F., 2019, "Silica aerogel/polyester blankets for efficient sound absorption in buildings", *Construction and Building Materials*, 220, 76-89.
- Ubeyitogullari, A., Ciftci, O. N., 2016, "Formation of nanoporous aerogels from wheat starch", *Carbohydrate Polymers*, 147, 125-32.
- Wu, W., Wang, K., Zhan, M.-S., 2012, "Preparation and Performance of Polyimide-Reinforced Clay Aerogel Composites", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 12821-12826.
- Zhang, J., Wang, J., Yang, C., Jia, H., Cui, X., Zhao, S., et al., 2017, "Mesoporous SiO₂/VO₂ double-layer thermochromic coating with improved visible transmittance for smart window", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 162, 134-141.
- Zhao, J.-J., Duan, Y.-Y., Wang, X.-D., Zhang, X.-R., Han, Y.-H., Gao, Y.-B., et al., 2013, "Optical and radiative properties of infrared opacifier particles loaded in silica aerogels for high temperature thermal insulation", *International Journal of Thermal Sciences*, 70, 54-64.
- Zhu, J., Xie, J., Lü, X., Jiang, D., 2009, "Synthesis and characterization of superhydrophobic silica and silica/titania aerogels by sol-gel method at ambient pressure", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 342, 97-101.
- Zinzi, M., Rossi, G., Anderson, A. M., Carroll, M. K., Moretti, E., Buratti, C., 2019, "Optical and visual experimental characterization of a glazing system with monolithic silica aerogel", *Solar Energy*, 183, 30-39.



HAŞHAŞ TOHUM (*Papaver somniferum* L.) YAĞININ BİYODİZEL YAKIT ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

¹Cüneyt CESUR , ²Tanzer ERYILMAZ , ³Tansu USKUTOĞLU , ⁴Hülya DOĞAN ,
⁵Belgin COŞGE ŞENKAL , ⁶Selen ALNIAK SEZER

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Karaman, TÜRKİYE

²Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

^{3,5}Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

⁴Yozgat Bozok Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

⁶Yozgat Bozok Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

¹cuneytcesur@kmu.edu.tr, ²tanzer.eryilmaz@bozok.edu.tr, ³tansu.uskutoglu@bozok.edu.tr,

⁴hulya.dogan@bozok.edu.tr, ⁵belgin.senkal@bozok.edu.tr, ⁶selen.alniak@bozok.edu.tr

(Geliş/Received: 28.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.08.2021)

ÖZ: Haşhaş (*Papaver somniferum* L.) hem dünyada hem de ülkemizde önemli bir tıbbi bitkidir. Aynı zamanda tohumlarından yağ elde edilmektedir. Bu çalışmada Yozgat ekolojik koşullarında yetiştiriciliği yapılan iki haşhaş çeşidinin (TMO-1 ve OFİS 8) tohumlarından soğuk presle elde edilen yağların, Transesterifikasyon yöntemi ile 2 aşamalı olarak üretimi gerçekleştirilerek bazı biyodizel özellikleri tespit edilmiş, standartlara uygunluğu incelenmiştir. Elde edilen veriler TMO-1 ve OFİS 8 çeşitleri için sırasıyla; kinematik viskoziteleri (40°C'de) 4.238, 4.139 mm²/s; yoğunlukları, 884.46 kg/m³, 883.82 kg/m³, parlama noktaları, 169°C, 164°C; su muhtevaları, 425.38 mg/kg, 496.39 mg/kg; bulutlanma noktaları, -3°C, -7°C; akma noktaları, -7°C, -16°C; donma noktaları, -11°C, -21°C; pH'ları, 7, 6.6; sülfat ve kül miktarları, 0.0095 m/m (%), 0.0110 m/m (%), SFTN, -1°C, -2°C olarak tespit edilmiştir. Elde edilen yakıt analiz sonuçlarının EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarına uygun olup olmadığı amaçlanmış ve uygunluk gösterdiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre haşhaş biyodizelleri B100 ya da daha farklı karışım yakıtların dizel motorlarda kullanılabilir özelliklere sahip olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Haşhaş, Tohum yağı, Yağ asidi, Viskozite, Yoğunluk

Determination of The Biodiesel Fuel Characteristics of Poppy (*Papaver somniferum* L.) Seed Oil

ABSTRACT: Poppy (*Papaver somniferum* L.) is an important medicinal plant both in the world and in our country. At the same time, oil is obtained from the seeds. In this study, the oils obtained from the seeds of two poppy cultivars (TMO-1 and OFİS 8) grown in Yozgat ecological conditions were produced by the Transesterification method in 2 stages, some biodiesel properties were determined and their compliance with the standards was examined. The data obtained are for TMO-1 and OFİS 8 cultivars; kinematic viscosities (at 40°C) 4.238, 4.139 mm²/s; densities, 884.46 kg/m³, 883.82 kg/m³, flash points, 169°C, 164°C; water contents, 425.38 mg / kg, 496.39 mg / kg; cloud points, -3°C, -7°C; pour points, -7°C, -16°C; freezing points, -11 ° C, -21 ° C; their pH is 7, 6.6; sulfate and ash amounts were determined as 0.0095 m/m (%), 0.0110 m/m (%), SFTN, -1°C, -2°C, respectively. It was aimed whether the obtained fuel analysis results comply with EN 14214 and ASTM D6751 standards and it has been seen that they

comply. According to these results, it can be said that poppy biodiesels B100 or different blended fuels have properties that can be used in diesel engines.

Key Words: *Poppy, Seed oil, Fatty acid, Viscosity, Density*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Haşhaş (*Papaver somniferum* L.) Papaveraceae familyasına ait alkaloitlerce zengin değerli bir ilaç ve keyf bitkisidir (Çizelge 1), (Rahimi ve diğ. 2011; Baydar 2013). Dünyada 22 tür ile temsil edilen haşhaşın, Türkiye’de 15’i endemik olmak üzere 58 taksonu bulunmaktadır (Davis, 1988; Güner ve diğ., 2012; USDA, 2020). Anavatanı ön Asya olan haşhaşın tarımı Anadolu’da Hititler döneminden beri yapılmaktadır. Osmanlı İmparatorluğu zamanında da gelir getirici bir bitki olarak önemini korumuştur. Ancak, haşhaş uyuşturucu özelliğinden dolayı, 1933 yılından beri ülkemizde yetiştiriciliği bazı kurallara göre yapılmaktadır. 1938 yılında Toprak Mahsülleri Ofisi (TMO)’nin kurulmasıyla beraber temini ve tarımı devlet gözetiminde yapılmaya başlanmıştır (Gümüşçü, 1996).

Çizelge 1. Haşhaş bitkisinin taksonomik sınıflandırması

Table 1. Taxonomic classification of opium poppy

Taksonomik sınıflandırma	Bilimsel ve yaygın adı
Alem (<i>kingdom</i>)	Bitkiler (<i>plantae</i>)
Alt alem (<i>subkingdom</i>)	Damarlı bitkiler (<i>tracheobionta- vascular plants</i>)
Üst bölüm (<i>subdivision</i>)	Tohumlu bitkiler (<i>spermatophyta-seed plants</i>)
Bölüm (<i>division</i>)	Çiçekli bitkiler (<i>magnoliophyta-flowering plants</i>)
Sınıf (<i>class</i>)	Dikotiledonlar (<i>mahnoliopsida-dicotyledons</i>)
Altsınıf (<i>subclass</i>)	Magnoliidae
Sıra (<i>order</i>)	Papaverales
Familya (<i>family</i>)	Papaveraceae
Cins (<i>genus</i>)	Haşhaş (<i>Papaver</i> L.-poppy)
Tür (<i>species</i>)	<i>Papaver somniferum</i> L. (<i>opium poppy</i>)

(USDA, 2020)

Türkiye’de haşhaş üretimi TMO izni ile 13 ilde 700 000 dekarlık sınırlı alanda gerçekleştirilmektedir. Birleşmiş Milletler Türkiye, Hindistan, Avustralya, Fransa, İspanya, Macaristan, Çek Cumhuriyeti ve Çin’i yasal ana üretici ülkeler olarak tanımlamıştır (İnan, 2013). Türkiye haşhaş üretiminde Çek Cumhuriyetinden sonra 2. sırada gelmektedir (FAO, 2020). 2019 yılı itibariyle Türkiye’de 27 288 ton haşhaş tohumu üretilmiştir (TÜİK, 2020). Haşhaş tohumlarında renklerine göre farklılık göstermekle beraber %42-58 arasında yağ ve %20-30 oranlarında protein bulunmaktadır (Kahraman, 2011). Doymamış yağ asitleri bakımından da zengin olduğu için iyi bir gıda kaynağıdır. Haşhaş tohumları yaygın olarak haşhaş ezmesi üretiminde veya pasta, börek gibi gıda ürünlerinde kullanılmaktadır (Baydar, 2013). Protein oranının yüksekliği sebebiyle de yağı sıkıldıktan sonra kalan küspesi iyi bir yem bitkisidir.

Bitkisel yağlar genel olarak sadece insan gıdası olarak değil, hayatın birçok alanında kullanılan önemli bir stratejik üründür (Aklale ve Aydeniz Güneşer, 2019). Haşhaş yağı da tıbbi tedavilerde, ilaç, boya, gıda ve enerji üretimi başta olmak üzere hayatın hemen her sahasında ihtiyaç duyulan bir hammaddedir (Aksoy, 2011; Dündar Emir, 2014). Aynı zamanda tohumlarından elde edilen yağ biyodizel hammaddesi olarak değerlendirilebilecek potansiyele sahiptir (Eliçin ve diğ., 2007).

Küresel ısınma ve iklim değişikliği kavramlarının gelecekte dünya için ciddi tehditler oluşturduğu birçok kaynakta ifade edilmektedir (Akın, 2006; Korkmaz, 2007; Bayraç, 2010). Nüfus artışı ile beraber tabii kaynaklarda meydana gelen daralmalara ilave olarak küresel iklim değerlerindeki bozulmalar tarım ve su kaynaklarının arz güvenliğini daha da riskli hale getirmektedir (Öztürk, 2002). Bu risklerin ortadan kaldırılması bütün dünyanın ortak meselesi olmasından öte bütün bilim zeminlerinin de çözüm için bir araya gelmesini gerektiren bir husustur (Kovancılar, 2001; Bayraç, 2010). Buradan hareketle bitkisel üretimde daha az su kullanarak daha fazla verim alabilmenin yolları araştırılmalıdır. Bu aynı zamanda hammadde maliyetinin düşük olması içinde önemlidir (Fan ve Burton, 2009; Atabani ve diğ., 2013). Çünkü bitkisel yağların biyodizel hammadde olarak kullanılmasının önündeki en büyük engel yağın maliyetidir (Leung ve diğ., 2010). Yazlık ve kışık olarak tarımı yapılabilen haşhaş bu amaca uygun bir bitki türüdür (Shukla ve diğ., 2015).

Bu kaynaklardan biri olan biyodizel yakıtlar ise 2000'li yılların başından itibaren özellikle AB kapsamında kullanımı tercih ve teşvik edilmeye başlanmıştır. AB'nin 2003/30/EC direktifi ile 2005 sonundan itibaren kullanılmaya başlanan fosil yakıtlara %2 oranında biyodizel katma mecburiyeti getirilmiştir. Bu oranı 2010 yılında %5.75 ve 2020 yılında ise %10'a çıkartılması hedef olarak belirlenmiştir (Hatunoğlu, 2010). Aynı hedefler için Türkiye'de söz konusu anlaşmaya imza atmış olsa da gerekli hammadde bulunamadığı için 16/07/2017 yılı sonunda %2 olarak belirlenen hedef, %0.5'e çekilmiştir (Karakoç ve diğ., 2018).

Bitkisel yağların biyodizel hammadde olarak öneminin yanı sıra, bu yağların biyodizel teknolojilerine uygunluğunun belirlenmesi de önemlidir. Çünkü biyodizel üretiminde kullanılacak her bitkisel yağın kendine has özellikleri mevcuttur ve bu özellikler birbirinden farklıdır (Bankoviç-Iliç ve diğ., 2012; Yaşar, 2016). Bu farklılıkların tespit edilerek kullanılacak teknolojilere uygun hale getirmek verimlilik için çok hayati bir konudur. Bitkisel yağlar dizel motorlarda doğrudan kullanılabilirse de yağların fosil dizel yakıt özelliklerine uygun hale getirilmediği takdirde, kullanıldığı motorlara zarar vermesi kaçınılmaz bir durumdur (Cvengros ve Cvengrosova, 2004).

Bu çalışmada Yozgat ekolojik koşullarında yetiştiriciliği yapılan iki farklı haşhaş çeşidinin tohumlarından elde edilen yağların bazı biyodizel özellikleri tespit edilerek standartlara uygunluğu incelenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Materyal (Material)

Araştırmada TMO'dan temin edilen iki haşhaş çeşidi (TMO-1 ve OFİS 8) materyal olarak kullanılmıştır (Çizelge 2, Şekil 1).

Çizelge 2. Çeşitlerin genel özellikleri

Table 2. General characteristics of the cultivars

Özellikler	TMO-1	OFİS 8
Tohum rengi	Sarı	Beyaz
Çiçek rengi	Beyaz	Beyaz
Yağ oranı (%)	47-51	48-51.6
Tescil tarihi/kurumu	07.04.2005/TMO	05.04.2011/TMO

(Yazici ve diğ., 2017; Yazici, 2018)

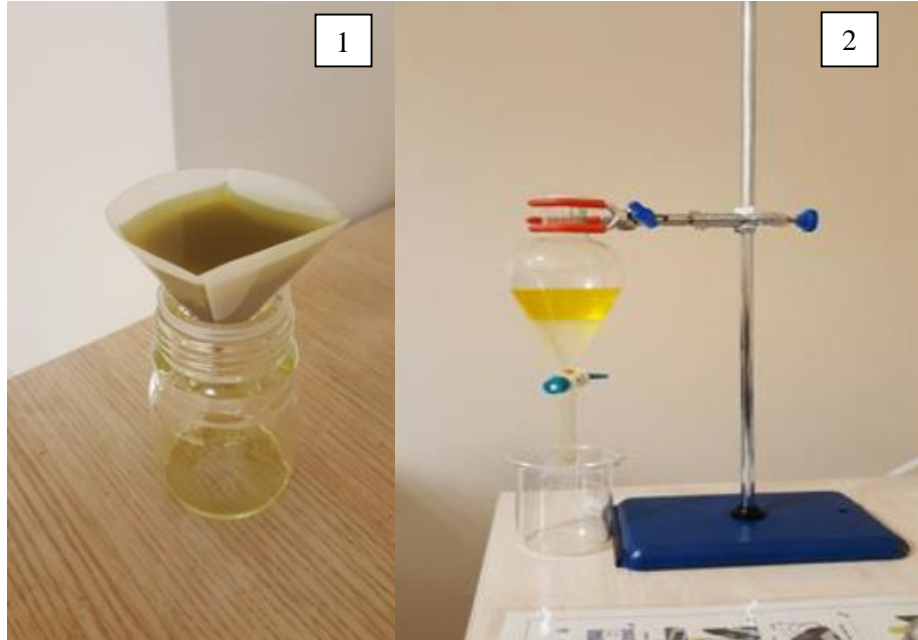
Tohum üretimi Yozgat Bozok Üniversitesi, Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi deneme sahasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Beyaz çiçekli haşhaş kapsülü (1), Üretim alanı (2)
Figure 1. The poppy capsule with white flower (1), Production area (2)

Haşhaş Çeşitlerinin Yağ Oranı ve Yağ Asidi Bileşenleri (The Oil Ratio and Fatty Acid Components of Poppy Cultivars)

Çeşitlere ait tohumların yağları hidrolik sistem soğuk pres makinası (Esen Yağ İşletmesi-İlgın/KONYA) ile elde edilmiştir.



Şekil 2. Whatman filtre kağıdından süzülen bitkisel yağın filtrelenmesi (1), Yıkanmış biyodizel (2)
Figure 2. Filtred vegetable oil through whatman filter paper (1), Washed biodiesel (2)

Yağ asidi bileşenleri tayini; GC-MS'de (Shimadzu - QP2010 ULTRA(GC-MS)) Avrupa Farmakopesinden alınan yöntemle yapılmıştır; ilk olarak sabit yağ esterleştirme işlemine tabi tutulmuştur. 450 mg yağ numunesi 50 mL'lik balon jöjeye alınır ve üzerine 12 mL 0.5 N metanol NaOH ilave edilir. Su banyosunda (yaklaşık 80°C sıcaklıkta) yağ damlacıkları çözeltiye karışmaya kadar çalkalanarak beklenir. Sabunlaşma gerçekleşince karışım su banyosundan alınır. Üzerine 20 mL BF₃/metanol ilave edilir ve bunzen bekinde kaynatılır. Soğuduktan sonra Doymuş NaCl çözeltisi ile

balon jopenin 50 mL çizgisine kadar tamamlanır. Bu sırada üst kısımda yağ damlacıkları birikir. Bu biriken yağ damlacıklarını almak için 1 mL hekzan ilave edilir, 10-15 kez kapağı kapatılan balon joje ters düz edilir. Faz ayrımı gerçekleştikten sonra en üst kısım alınarak viyale aktarılır ve GC-MS'e okutulmak üzere verilir (David ve diğ., 2005).

Biyodizel Üretimi (Biodiesel Production)

Çalışmada haşhaş yağının bazı fiziko-kimyasal özellikleri (biyodizelinin kinematik viskozite, yoğunluk, kalori değeri, parlama noktası, su muhtevası, renk ve pH, kül miktarı, bulutlanma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası ve donma noktası) Çizelge 3'te verilen cihaz ve çalışma metotlarına göre tespit edilmiştir.

Haşhaş tohumu ham yağlarından biyodizel üretimi transesterifikasyon yöntemiyle Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Biyosistem Mühendisliği bölümünde bulunan ısıtıcılı manyetik karıştırıcı ile iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Haşhaş tohumu ham yağlarından biyodizel, üretilmeden önce filtre edilerek içerisindeki yabancı maddeler giderilmiştir. Alkol olarak metil alkol ve katalizör olarak NaOH kullanılmıştır. Birinci reaksiyonda, 1000 mL ham yağ için kullanılacak %20 (200 mL) metil alkolün; %75'i (150 mL) metil alkol, her bir litre yağ için kullanılacak 3.5g NaOH'ın %50'si (1.75 g) NaOH ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda çözülerek metoksit elde edilmiştir. Elde edilen bu metoksit 55°C'de ısıtılarak karıştırılan yağ üzerine eklenmiştir. Karıştırma işleminde karıştırıcının devir sayısı 1000 d/d'ye ayarlanmıştır ve karışım 90 dakika karıştırılmıştır. Sonra karıştırıcı ve ısıtıcı durdurulmuştur. Gliserolün çökmesi için 120 dakika beklenmiş ve gliserol alınmıştır. Daha sonra ikinci aşamaya geçilmiştir.

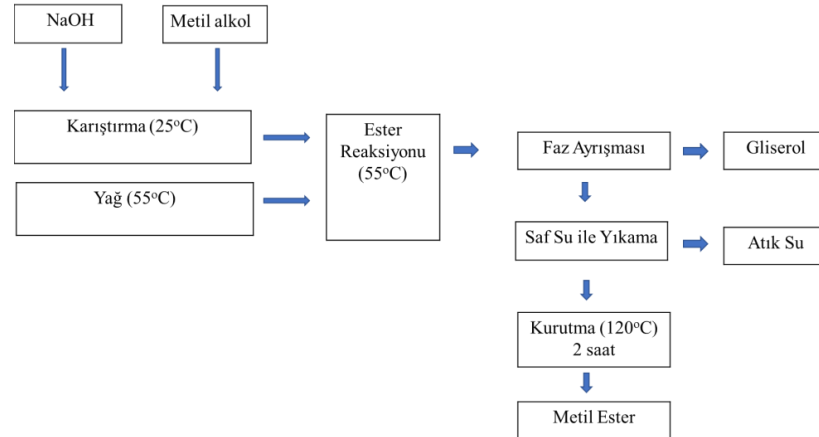
İkinci reaksiyonda, kalan %25 (50 mL) metil alkol ve %50 (1.75 g) NaOH ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda çözülerek metoksit elde edilmiştir. Birinci reaksiyonu gerçekleştiren ham biyodizel, karıştırıcı çalıştırılarak tekrar 55°C'ye ısıtılmış, üzerine metoksit eklenmiş ve 60 dakika reaksiyona tabi tutulmuştur. Sonra karıştırıcı ve ısıtıcı kapatılmıştır. Tekrar gliserol almak için 2 saat dinlendirilmiş ve gliserol alınmıştır. Ham biyodizelin sıcaklığı 75°C'ye kadar yükseltilmiş ve ham biyodizel içerisinde kalan metil alkol alınmıştır (Şekil 3).

Ham biyodizel içerisinde kalan gliserolün çökmesi için 15 saat beklenmiş ve gliserol alınmıştır. Bu arada biyodizelin pH değerine bakılmış, reaksiyon bazik karakterli olduğu için nötrleşinceye kadar saf su kullanılarak mistleme yöntemi ile yıkamaya tabi tutulmuştur. Yıkamanın amacı, biyodizel içerisinde reaksiyona girmeyen alkol, kalan yağ asitleri, Na⁺, K⁺ iyonları, katalizör madde ve ayrıştırma esnasında bünyede kalma ihtimali olan gliserolün uzaklaştırılmasıdır. Yıkama sırasında biyodizel sıcaklığı 50°C ve yıkamada kullanılan saf suyun sıcaklığı da 50°C olmak üzere, biyodizelin %20' si kadar saf su kullanılarak yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yıkama işleminden sonra suyun çökmesi için 12 saat beklenmiş ve çöken atık su alınmıştır. Çöken suyu alınan ham biyodizel, 120°C de 2 saat kurutma işlemi yapılmış ve böylece biyodizellerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Araştırma araçları ve özellikleri

Table 3. Research tools and features

Yakıt Özelliği	Cihazlar	Aralık	Birim	Ayar (doğruluk ayarı)	Üretici	Standart
Yoğunluk	Kem-Kyoto DA-645	Yoğunluk:0.00000–3.00000 Sıcaklık: 0–93	g cm ⁻³ °C	±0.00005 ±0.03	Kem Kyoto Elektronik, Japonya	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Kinematik Viskozite	Polyscience 7306A12E	Ortam sıcaklığı -150 Ölçüm tüpü: 1.2–10 Ölçüm tüpü: 5–50 Kronometre: 0–2400	°C mm ² s ⁻¹ mm ² s ⁻¹ s	±0.05 ±0.5 ±1 ±0.01	Polyscience, USA	EN ISO 3104
Parlama Noktası	Hızlı test cihazı RT-1	-30 to +300	°C	±1	Paul N. Gardner Company, USA	EN ISO 2719 EN ISO 3679
Su Muhtevası	Kem Kyoto MKC-520 Karl Fischer Nem Titratörü	10–300.000	µg	±0.1	Kem Kyoto Elektronik, Japonya	EN ISO 12937
Kalori Değeri	IKA C200 Patlamalı Isı Ölçer	0–40.000	J	±0.1	IKA, UK	DIN 51900
pH	Laboratuvar kitleri ELE-PHP3BW	pH aralığı: 0–14 Sıcaklık aralığı: 0–100	pH °C	±0.01 ±1	Labkits, Hong Kong	-
Renk	Lovibond PFXi 195/2	0.5–8	-	±0.0004	Lovibond, UK	ASTM D 1500
Bulut, akma, donma ve soğuk filtre tıkanma noktaları	Laboratuvar kitleri PT-SYD-510F1 çok işlevli düşük sıcaklık test cihazı	-70–Ortam sıcaklığı	°C	±0.5	Labkits, Hong Kong	EN ISO 3015 EN ISO 3016 ASTM D 6371



Şekil 3. Biyodizel üretim süreci akış diyagramı

Figure 3. Biodiesel production process flow diagram

Biyodizelin Kül ve Element Miktarları (Ash and element content of biodiesel)

Haşhaş biyodizelindeki kül miktarı ASTM D482 standartlarına göre belirlenmiştir. 4 ml'lik 0.1 N HCl ile yıkanan kül örnekleri Whatman No: 1 filtre kağıtları ile filtre edildikten sonra nitrik asit solüsyonu ile 5 kere seyreltilmiş ve iCAP-Qc ile element analizi gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR (RESULTS)**Ham Yağ Oranı ve Yağ Asidi Kompozisyonları (Crude Fat Content and Fatty Acid Compositions)**

Çalışmada kullanılan 2 haşhaş çeşidinden elde edilen yağların yağ asidi kompozisyonları Çizelge 4'de verilmiştir. Yağ asitleri analizi sonucunda TMO-1 tohum yağının %13.39' u doymuş ve %86.60' ü doymamış OFİS 8 tohum yağının %11.96' sı doymuş ve %87.07' si doymamış yağ asitlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Her iki çeşitte doymamış yağ asitleri içerisinde en yüksek oranı linoleik asit oluşturmuş ve bunu oleik asit izlemiştir. Doymuş yağ asitleri içerisinde ise palmitik asit en yüksek değere sahip olmuştur.

Çizelge 4. Haşhaş çeşitlerinin yağ oranı ve yağ asidi kompozisyonları*Table 4. The oil ratio and fatty acid compositions of poppy cultivars*

Yağ Asidi	Kimyasal Formülü	Ham Yağın Yağ Asidi Kompozisyonu (%)	
		TMO-1	OFİS 8
Miristik	C14:0	1.73	-
Palmitik	C16:0	7.18	8.93
Palmitoleik	C16:1	1.66	0.97
Stearic	C18:0	-	-
Oleik	C18:1	23.06	12.02
Linoleik	C18:2	53.50	73.09
Linolenik	C18:3	1.06	0.23
Araşidik	C20:0	1.45	0.78
Eikosenoik	C20:1	6.06	0.56
Behenik asit	C22:0	0.28	1.70
Lignoserik asit	C24:0	0.33	0.20
Nervonik asit	C24:1	0.98	0.22
Pentacosylic asit	C25:0	0.71	0.35
Pentacos-2-enoik asit	C25:1	0.28	-
Nonacosylic asit	C29:0	1.71	-
Doymuş yağ asitleri		13.39	11.96
Tekli doymamış yağ asitleri		32.04	13.75
Çoklu doymamış yağ asitleri		54.56	73.32
Toplam		99.95	99.03
Ham yağ oranı		44	47

Haşhaş Yağı Biyodizelinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Physical and Chemical Properties of Poppy Oil Biodiesel)

Haşhaş yağının TMO-1 ve OFİS 8 çeşitlerine ait biyodizelinin ve EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarının bazı fiziksel özellikleri Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelge 5 göre Dünyada en çok kullanılan bu standartlarla haşhaş yağı biyodizelinin mukayese edildiğinde, haşhaş yağı biyodizelinin genellikle standart değerlere uygun olduğu tespit edilmektedir. Kinematik viskozite, biyodizel standartları içerisinde önemli bir parametredir. Çünkü viskozitesi yüksek olan yakıtların atomizasyonu yeterli seviyede olamayacağı için, yanma işleminden sonra motorlarda kurum ve tortu oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum motorun verimsiz kullanılması demektir. Transesterifikasyon işleminden sonra yağın viskozitesi önemli ölçüde azalmaktadır (Demirbaş, 2009; Atabani, ve diğ., 2013). Çalışmada tespit edilen kinematik viskozite (40°C) TMO-1 çeşidinde 4.238 ve OFİS 8 çeşidinde ise 4.139 olarak tespit edilirken bu değerlerin gerek EN 14214 ve gerekse de ASTM D6751 standartlarının sınırları içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. Haşhaş yağı biyodizelinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Table 5. Physical and chemical properties of poppy oil biodiesel

Özellik	Birim	EN 14214	ASTM D6751	TMO-1	OFİS 8
Kinematik viskozite (40°C)	mm ² /s	3.5-5	1.9-6	4.238	4.139
Kinematik viskozite (70°C)		-	-	2.608	2.493
Kinematik viskozite (100°C)		-	-	1.761	1.687
Yoğunluk (15°C)	kg/m ³	860-900	860-900	884.46	883.82
Parlama noktası	°C	101 min.	130 min	169	164
Su muhtevası	mg/kg	500 max		425.38	496.39
Bulutlanma noktası	°C	rapor		-3	-7
Akma noktası	°C	rapor		-7	-16
Donma noktası	°C	-	-	-11	-21
Renk (ASTM D1500)	0.5-8.0	-	-	1.4	1.6
pH	-	-	-	7	6.6
Sülfatlanmış kül miktarı	m/m(%)	0.02 max	0.05 max	0.0095	0.0110
Soğuk filtre tıkanma noktası (SFTN)	°C	rapor		-1	-2

Biyodizel yoğunluğu, motorların yanma sistemlerinde yakıtın atomizasyon verimliliğini etkilemesi bakımından önemli işlevi bulunmaktadır (Bhuiya ve diğ., 2020). Doymamış yağ asitleri yüksek olan yağların yoğunluğu artmaktadır (Silitonga ve diğ., 2013). Biyodizel yoğunluğu ASTM ve EN standartlarına göre 860-900 kg/m³ aralığındadır. Çizelge 5’den görüleceği üzere haşhaş biyodizelinin yoğunluk değerleri her iki standarda göre uygun değerler göstermektedir.

Yakıt buharının ateşle temas ettiğinde bir an için alev aldığı sıcaklığa parlama noktası denir (Tillem, 2005). Çizelge 5’den izlenebileceği gibi haşhaş biyodizellerinin parlama noktaları TMO-1 çeşidinde 169 ve OFİS 8 çeşidinde 164 olarak tespit edilmiştir. Genellikle biyodizel yakıtların parlama noktaları dizel yakıtlara göre daha yüksek seyretmekte olduğu bilinmektedir. Bu durum yakıtların nakliye ve

depolama gibi durumlarda daha emniyetli bir ortam oluştururken, motorların performansını olumsuz etkileyebilmektedir (Shah ve diğ., 2014).

Bulutlanma noktası ve akma noktası düşük sıcaklıklarda yakıtlar için göz önünde bulundurulması gerekli iki önemli unsurdur. Akma noktası, ortam soğutulurken yakıtın akış özelliklerini kaybettiği minimum sıcaklık olarak tanımlanabilir. Çizelge 5' ten izlenebileceği gibi ASTM D6751 standartlarına göre akma noktası (-15) – (-16) °C ve bulutlanma noktası (-3) – (-12) °C aralıkları tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise akma noktaları çeşitlere göre TMO-1 çeşidinde -7°C ve OFİS 8 çeşidinde -16°C ve bulutlanma noktaları TMO-1'de -3 °C, OFİS 8 çeşidinde -7°C olarak belirlenmiştir. Bu gerçekleşen değerlere göre haşhaş yağı biyodizelinin akma ve bulutlanma noktaları fosil yakıtlara göre daha iyi bir kullanım şartlarına sahip olduğu görülmektedir.

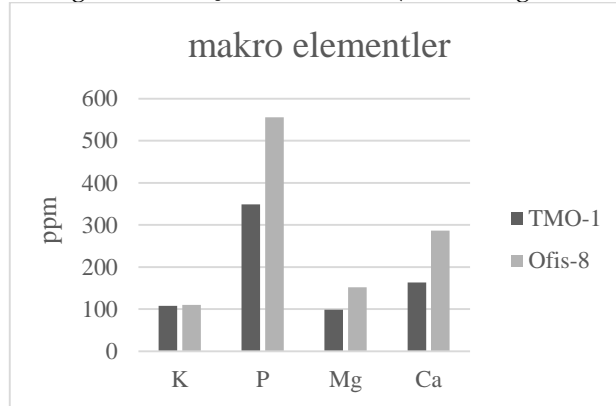
Soğuk filtre tıkanma noktası (SFTN) yakıtın jelleşmeye başladığı sıcaklığı ifade eder. Jelleşme yakıtın akışkanlığını kaybetmesine sebep olur. Akışkanlığı kaybolan bir yakıt ise motorun verimli çalışmasına engel olur. ASTM ve EN standartlarına göre SFTN 5 – 19°C aralığındadır. Bu değer TMO-1 çeşidi için -1 ve OFİS 8 çeşidi için -2 olarak tespit edilmiştir (Çizelge 5).

Yakıtın kükürt ve kül miktarı hem çevre hassasiyeti bakımından hem de motorun verimliliği bakımından önemlidir. Tablo 3'den görüldüğü üzere EN ve ASTM standartlarına göre kükürt ve kül miktarları max. 0.02 ve 0.05 m/m (%) olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise TMO-1 çeşidinde 0.0095 m/m (%) ve OFİS 8 çeşidinde 0.011 m/m(%) olarak belirlenmiştir. Değerler mukayese edildiğinde kül ve kükürt miktarları bakımından haşhaş yağı biyodizelinin değerleri daha verimli kullanılabilir aralıklarda olduğu görülmektedir.

Haşhaş Yağı Biyodizelinin Element Madde İçeriği (Element Content of Poppy Oil Biodiesel)

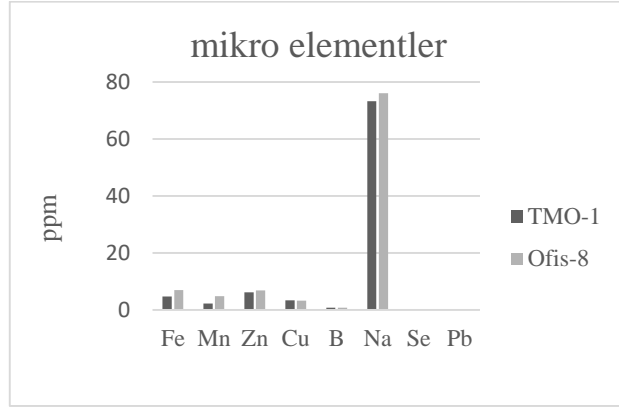
Haşhaş yağı biyodizelinde Şekil 4'de görüldüğü gibi makro elementler olarak potasyum (K), fosfor (P), magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) tespit edilmiştir. Çalışmada incelenen her iki çeşitte de aynı makro elementler olduğu görülürken, OFİS 8 çeşidinde nispeten daha yüksek değerler tespit edilmiştir. Çalışmada, Şekil 5'te görüldüğü gibi, mikro elementler olarak da Demir (Fe), Mangan (Mn), Çinko (Zn), Bakır (Cu), Bor (B), Sodyum (Na), Selenyum (Se) ve Kurşun (Pb) tesbit edilmiştir. Mikro elementlerden en fazla her iki çeşitte de Na tespit edilirken OFİS 8 çeşidinin Na miktarı nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. Ağır metallere ise, Şekil 6'da görüldüğü gibi, Kadmiyum (Cd), Baryum (Ba), Alüminyum (Al), Uranyum (U), Krom (Cr), Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) olduğu tespit edilmiştir. Her iki çeşitte de ağır metal birikimi en fazla Ba, Al ve Ni ağır metallere olduğu görülürken, TMO-1 çeşidinde Ni daha fazla görülürken, OFİS 8 çeşidinde ise Ba ve Al birikiminin daha fazla olduğu görülmektedir.

Düşük konsantrasyonlarda bulunmasına rağmen, fosfor dizel motorların egzoz sistemindeki katalitik dönüşümü etkiler ve karbon monoksit ve karbon dioksit, kükürt dioksit, hidrokarbonlar ve partikül maddeler gibi kirletici gazların oluşumunu artırır (Lira ve diğ., 2011).



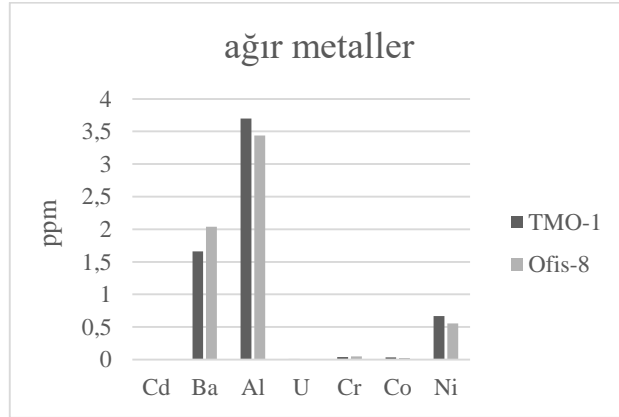
Şekil 4. Haşhaş yağı biyodizelinde tespit edilen makro elementler

Figure 4. Macro elements detected in poppy oil biodiesel



Şekil 5. Haşhaş yağı biyodizelinde tespit edilen mikro elementler

Figure 5. Micro elements detected in poppy oil biodiesel



Şekil 6. Haşhaş yağı biyodizelinde tespit edilen ağır metaller

Figure 6. Heavy metals detected in poppy oil biodiesel

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Fosil yakıt rezervlerinin tükenebileceği ve bu yakıtların çevreye vermiş olduğu zararların fark edilmesinden bu yana alternatif enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bitkisel yağların motorlarda kullanılabilmesi, neredeyse yüzyıl evvelen bu yana bilinmesine rağmen, fosil yakıtlara ulaşımın kolay olması sebebiyle pek üzerinde durulmamıştır. Alternatif enerji kaynaklarına yönelim başlayınca biyodizel üretim ve teknolojileri konularında da yoğun olarak çalışmaya başlanmış ve bitkisel yağların fiziksel ve kimyasal özellikleri tespit edilerek fosil yakıtlar yerine kullanılmasının usulleri belirlenmeye başlanmıştır. Haşhaş yağları da bu kapsamda incelenmiştir. Elde edilen verilere göre haşhaş yağlarının biyodizellerinin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin fosil yakıt özelliklerinden daha iyi değerler gösterdiği görülmüştür. Bu değerlere göre haşhaş biyodizelinin gerek B100 olarak gerekse de karışım yakıtlar halinde dizel motorlarda kullanılabilmesini ifade etmek mümkündür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aklale, B., Aydeniz Güneşer, B., 2019, "Haşhaş Tohumu İçeren Peynir Formülasyonlarının Geliştirilmesi ve Kalite Parametrelerinin Değerlendirilmesi", *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, Cilt 3, Sayı 1, ss. 24-36.
- Akın, G., 2006, "Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları", *Ankara Üniversitesi, Dil ve tarih Coğrafya Fakültesi Dergisi*, Cilt 46, Sayı 2, ss. 29-43.

- Aksoy, L., 2011, "Opium Poppy (*Papaver somniferum* L.) Oil for Preparation of Biodiesel: Optimisation of Conditions ", *Applied Energy*, Cilt 88, ss. 4713-4718.
- Atabani, A.E., Silitonga, A.S., Ong, H.C., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H., Badruddin, I.A., Fayaz, H. 2013, "Non - Edible Vegetable Oil Extraction, Fatty Acid Compositions, Biodiesels Production Characteristics, Engine Performance and Emissions Production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, pp. 211-245.
- Bankoviç-Iliç, I.B., Stamenkoviç, O.S., Veljkoviç, V.B., 2012, "Production from non-edible plant oil", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp: 3621-3647.
- Bayraç, H.N., 2010, "Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar", *Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*, Cilt 11, Sayı 2, ss. 229-259.
- Bhuiya, M.M.K., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Ashwath, N., 2020, "Biodiesel production and characterization of poppy (*Papaver somniferum* L.) seed oil methyl ester as a source of 2nd generation biodiesel feedstock", *Industrial Crops and Products*, Vol. 152, Article Number: 112493.
- Cvengros, J., Cvengrosova, Z., 2004, "Used frying oils and fats and their utilization in the production of methyl esters of higher fatty acids", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, pp. 173-181.
- David F., Sandra P., Vickers A.K., 2005, Column selection for the analysis of fatty acid methyl esters, *Food Analysis, Agilent Technologies Application Notes*, pp. 1-12.
- Davis. P.H., Mill. R.R., Tan. K., 1988, *Papaver L. Flora of Turkey and East Aegean Islands*. University Press, Edinburg.
- Demirbaş, A., 2009, "Progress and recent trends in biodiesel fuels", *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 14-34.
- Dündar Emir, D., 2014, *Soğuk Pres Yöntemiyle Elde Edilen Haşhaş Yağlarının, Yağsız Keklerinin ve Protein İzolatlarının Teknolojik ve Fonksiyonel Özelliklerinin Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.
- Eliçin, A.K., Saçılık, K., Erdoğan, D., 2007, "Haşhaş Yağı Esterlerinin Bir Dizel Motorda Kullanım Olanaklarının Belirlenmesi", *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, Cilt 3, Sayı 3, ss. 137-144.
- Fan, X., Burton, R., 2009, "Recent Development of Biodiesel Feedstock and The Applications of Glycerol: A Review", *Open Fuels Energy Science Journal*, Vol. 2, pp. 100-109.
- FAO, 2020, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>, ziyaret tarihi: 7.12.2020.
- Gümüşçü, A., 1996, *Seçilmiş Bazı Haşhaş (*Papaver somniferum* L.) Çeşit ve Hatlarının Verim Ögelerinin Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Güner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M., Babac, M.T., 2012, *Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı bitkiler). Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını. İstanbul.*
- Hatunoğlu, E.E., 2010, *Biyoyakıt Politikalarının Tarım Sektörüne Etkileri*. DPT Uzmanlık Tezi, Yayın No:2814, Ankara.
- İnan, Ş., 2013, *Haşhaşta (*Papaver somniferum* L) Bazı Tarımsal Özellikler İle Yağ ve Morfin Miktarının Belirlenmesi*. Adnan Menderes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Aydın.
- Kahraman, M. 2011. *Türkiye'de Haşhaş'ta Uygulanan Politikalar ve Haşhaşın Türkiye için Önemi*, Namık Kemal Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Karakoç, E.B., Ayvaz, B., Kuşakçı, A.O., Öztürk, F., 2018, "Biyodizel Yakıtlar İçin Çok Önemli Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı Örneği", *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi Part C.*, Cilt 6, Sayı 4, ss. 862-876.
- Korkmaz, K., 2007, "Küresel Isınma ve Tarımsal Uygulamalara Etkisi", *Alatırım Dergisi*, Cilt 6, Sayı 2, ss. 43-49.
- Kovançlar, B. 2001. "Küresel Isınma Sorununun Çözümünde Karbon Vergisi ve Etkinliği", *Yönetim ve Ekonomi*, Cilt 8, Sayı 2, ss. 1-13.
- Leung, D.Y.C., Wu, X., Leung, M.K.H., 2010, "A Review on Biodiesel Production using Catalyzed Transesterification", *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1083-1095.

- Lira, L.F.B., dos Santos, D.C.M.B., Guida, M.A.B., Stragevitch, L., Korn, M.das G.A., Pimentel, M.F., Paim, A.P.S. 2011. Determination of phosphorus in biodiesel using FIA with spectrophotometric detection. *Fuel*. 90:3254-3258.
- Öztürk, K., 2002, "Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye'ye Olası Etkileri", *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, Sayı 1, ss. 47-65.
- Rahimi, A., Kırılan, M., Arslan, N., Bayrak, A., Doğramacı, S., 2011, "Variation in Fatty Acid Composition of Registered Poppy (*Papaver somniferum* L.) Seed in Turkey", *Akademik Gıda*, Cilt 9, Sayı 3, ss. 22-25.
- Shah, M., Ali, S., Tariq, M., Khalid, N., Ahmad, F., Khan, M.A., 2014, "Catalytic Conversion of Jojoba Oil into Biodiesel by Organization Catalysts, Spectroscopic and Chromatographic Characterization", *Fuel*, Vol. 118, pp. 392-397.
- Shukla, S., Mishra, B.K., Mishra, R., Siddiqui, A., Pandey, R., Rastogi, A., 2015, "Comparative Study for Stability and Adaptability Through Different Models in Developed High the Baine Lines of Opium Poppy (*Papaver somniferum* L.)", *Industrial Crops Product*, Vol. 74, pp. 875-886.
- Silitonga, A.S., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I., Ong, H.C., Chong, W.T., Boosroh, M.H., 2013, "Overview Properties of Biodiesel – Diesel Blends from Edible and Non – Edible Feedstock", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, pp. 346-360.
- Tillem, İ. 2005, *Dizel Motorlar için Alternative Yakıt Olarak Biyodizel Üretimi ve Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- TÜİK, *Türkiye İstatistik Kurumu*, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-2.Tahmini-2020-33736>, ziyaret tarihi: 07.12.2020.
- USDA (United States Department of Agriculture), *Classification for Kingdom Plantae Down to Genus Papaver* L. <https://plants.usda.gov/java/ClassificationServlet?source=profile&symbol=PAPAV&display=31>, ziyaret tarihi:06 Kasım 2020.
- USDA (United States Department of Agriculture), <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=PASO2> erişim tarihi 09.12.2020.
- Yaşar, F., 2016, *Yosun Yağından Biyodizel Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Yakıt Olarak Kullanılması*. Doktora tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Yazici, L., Yılmaz, G., Gökcalp, S., 2017, "Bazı Haşhaş (*Papaver somniferum* L.) Çeşit ve Genotiplerinin Alkaloid ve Yağ Oranlarının Belirlenmesi", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, Cilt 20, Özel Sayı, ss. 313-317.
- Yazici, L., 2018, *Bazı haşhaş (Papaver somniferum L.) Diallel Melezlerinde Verim ve Kalite Özellikleri ile Heterosis Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.



AN ECONOMIC AND TECHNICAL REVIEW FOR THE UTILIZATION OF HVDC IN TURKEY AND IN THE WORLD

¹Hakan ACAROĞLU , ²Atabak NAJAFI , ³Ömer KARA , ⁴Burcu YÜRÜK 

^{1,3}Eskisehir Osmangazi University, Economics and Administrative Sciences Faculty, Economics Department,
Eskisehir, TURKEY

²Eskisehir Osmangazi University, Engineering and Architecture Faculty, Electrical and Electronics Engineering
Department, Eskisehir, TURKEY

⁴Usak University, Accounting and Finance Management Department, Usak, TURKEY

¹hacaroglu@ogu.edu.tr, ²ataberknajafi@ogu.edu.tr, ³okara@ogu.edu.tr, ⁴burcu.yuruk@usak.edu.tr

(Geliş/Received: 31.03.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.06.2021)

ABSTRACT: In recent years, it is seen that High Voltage Direct Current (HVDC) transmission line systems have come to the fore in the field of energy efficiency in the world. Therefore, it is predicted that analyzing the technological and economic advantages of HVDC transmission line systems will make an important contribution to energy efficiency policies. In this regard, this study aims to examine the technological and economic advantages of HVDC transmission systems through the historical development with applications in Turkey and in the world. In addition to this, it is expected that the evaluation of the effects of energy efficiency on the economy will bring a different perspective to the energy and economic literature. Therefore, it is thought that energy and economic policies for the spread of HVDC transmission line systems worldwide will be essential. The asymmetric distribution of natural energy sources in the world causes energy supply security problems in the countries such as Turkey in terms of high foreign dependence on energy. For this reason, it is necessary to meet the increasing energy demand and increase the existing capacity day by day. Besides, it is important to develop policies for efficient use of energy. HVDC technology is extremely important for a developing country like Turkey. Moreover, it is known that this energy transmission technology has become widespread in developed countries. Thereby, a technical comparison is done for investment costs of the transmission system in Germany. As a result, other than bringing economic benefits with the energy transmission of Turkey through HVDC, it has important potential for making energy transmission possible with her neighbors and European Union countries.

Key Words: High voltage direct current, Transmission line system, Energy, Turkey

Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) İletim Hatlarının Türkiye ve Dünyada Kullanımına İlişkin Ekonomik ve Teknik Bir İnceleme

ÖZ: Son yıllarda dünyada enerji verimliliği alanında Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) iletim hattı sistemlerinin ön plana çıktığı görülmektedir. Bu nedenle, YGDA iletim hattı sistemlerinin teknolojik ve ekonomik üstünlüklerinin analiz edilmesinin enerji verimliliği politikalarına önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda bu çalışma, YGDA iletim hattı sistemlerinin, Türkiye’de ve dünyada tarihsel gelişimi ile uygulama örnekleri üzerinden teknolojik ve ekonomik avantajlarının incelenmesini amaçlamaktadır. Buna ek olarak, çalışmada enerji verimliliğinin ekonomi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinin, enerji ve ekonomi literatürüne farklı bir bakış açısı getireceği beklenmektedir. Böylece, YGDA iletim hattı sistemlerinin dünya genelinde yaygınlaşmasına yönelik enerji ve ekonomi

politikalarının önem kazanacağı düşünülmektedir. Dünyada doğal enerji kaynaklarının asimetric dağılımı, Türkiye gibi enerjide dışa bağımlılığı yüksek olan ülkeler açısından enerji arz güvenliği sorununa neden olmaktadır. Bu sebeple her geçen gün artan enerji talebinin karşılanması ve mevcut kapasitenin artırılması gerekmektedir. Ayrıca, enerjinin verimli kullanılmasına yönelik politikaların geliştirilmesi de önem taşımaktadır. YGDA teknolojisi Türkiye gibi gelişmekte olan bir ülke için son derece önemlidir. Ayrıca gelişmiş ülkelerde bu enerji iletim teknolojisinin yaygınlaştığı bilinmektedir. Bu nedenle, Almanya'daki bir iletim sisteminin yatırım maliyetleri için teknik bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuç olarak, Türkiye'nin enerji iletimini YGDA ile sağlaması ekonomik getirilerinin yanı sıra, komşu ve Avrupa Birliği ülkeleriyle enerji iletimini mümkün kılması açısından ekonomik bir potansiyel de taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek gerilim doğru akım, İletim hattı sistemi, Enerji, Türkiye.

1. INTRODUCTION

Demand for electrical energy, which is an important production input alongside labor and capital, continues to increase worldwide day by day. Especially in developing countries including Turkey, foreign dependence on energy leads to an increase in the current deficit by playing an import increasing role in meeting the growing demand. This situation affecting the economy reveals the necessity of countries to handle their energy policies with economic policies. In recent years, it is observed that the policies of countries to reduce foreign dependency and increase their existing production capacity have accelerated for each country in order to meet the increasing demand. In this context, not only the capacity increase but also ensuring the efficiency of existing capacity contributes to the rapid development of transmission line technologies. When the historical process is analyzed, it is seen that the electrical energy transmission and distribution, which is used extensively, is realized as alternating current (AC) and direct current (DC). The network development in different periods varies in terms of voltage class, network size, generator unit capacity, and technical and economic aspects due to the developments in transmission technologies over time. Based on these aspects, the history of the network development can be separated into different phases. From the end of nineteenth century to the midst of the twentieth century, the electrical network became prominent with the usage of AC in production and transmission as well as its distribution. It was the first phase that ceased with the end of the World War II. During this phase, the generator unit capacity was less than 200 MW; AC transmission was prevailing only up to 220 kV (Liu, 2014).

Higher voltage transmission systems that are needed in this period and become widespread over time can be classified as high voltage (HV-35-220kV), extra-high voltage (EHV-330-1000kV), and ultra-high voltage (UHV-1000kV and more) (Long and Nilsson, 2007). The implementation of electricity transmission, which is used extensively today, with the least cost and transmission loss is of great importance in terms of ensuring energy efficiency and positive effects on the national economies.

It is observed that the use of HVDC transmission line systems has become widespread with its technological and economic advantages, and parallel to this, studies on HVDC transmission line systems have also become widespread. When these studies are examined, it is seen that studies especially on technical aspects such as the integration of HVDC transmission lines into existing AC networks (Brask, 2008; Burger and Tuson, 2005), effects on network reliability and development (Kotb, 2018; Stenberg, 2013), functionality of HVDC converter at world stations (Almgren *et al.*, 1998; Beerten *et al.*, 2014), reliability of test systems (Bertling and Pramod, 2011), VSC (voltage source converter)-HVDC modeling (Träff and Lennerhag, 2013), location determination for in-network application (Shuai, 2012) and applicability at distribution level (Giraneza, 2013) become prominent. In a limited number of studies evaluating the market structure, geographical distribution, and technical/economic superiority of HVDC transmission line systems, it is seen that the subject has been examined within the scope of engineering science (Alassi *et al.*, 2019; Gamit *et al.*, 2015; Rudervall *et al.*, 2000). It is seen that the studies focused on the details of HVDC transmission line systems are generally focused on their applications in China (Mircea and Philip, 2017; Cao and Cai, 2013; Pudney, 2012).

In this interdisciplinary study, the technological and economic advantages of HVDC transmission line systems are evaluated within the scope of engineering and economics. Thereby, a technical comparison is shown for investment costs of the transmission system in a developed country: Germany. Finally, other than bringing economic benefits with the energy transmission of Turkey through HVDC, it has important potential for making energy transmission possible with Turkey's neighbors and European Union countries. It is thought that this study will give a different perspective to the literature especially with its evaluations regarding the energy efficiency of HVDC transmission line systems and its role in reducing foreign dependence on energy in the future. In addition, it is anticipated that this study will contribute to the joint evaluation of energy and economic policies to be developed for the applicability of HVDC transmission line technologies in countries with high foreign dependence on energy, especially in Turkey.

2. HIGH VOLTAGE CLASSES: ADVANTAGES VERSUS DISADVANTAGES

Historically, when examining high voltage classes, HVAC has been the major transmission technology that benefited from the initial advancement of AC transformers. It is because AC allows the HVAC transmission for longer distances and lower losses, as well as "Current Wars" resulting in favor of Tesla. Nonetheless, with the development of mercury arc valves and their prevailing adoption in the 1930s and HVDC allowing energy to be transmitted at higher voltages, DC has entered the transmission market again (Alassi *et al.*, 2019). The advantages versus disadvantages of HVDC can be found as follows:

HVDC Advantages:

- Lowering line cost as HVDC transmission requires fewer conductors; for example, two conductors are used for a typical bipolar HVDC line compared to three-phase HVAC.
- HVDC transmission lines cause reduction of Corona losses compared to HVAC of similar power.
- As HVDC can carry more power per conductor of given size, there is a reduction of the wiring and strut profile for a given power transmission capacity.
- HVDC uses power electronic systems in transmission lines. Since these devices have no mechanical moving parts, there is less probability of failure, so have very robust performance and long life under the nominal conditions.
- It is an undeniable fact that the least harmful transmission to the environment is DC transmission.
- Less losses on DC lines makes DC transmission a more efficient system.
- With the HVDC system, the power flow can be controlled quickly and precisely both the power level and the direction.

HVDC Disadvantages:

- HVDC transmission lines are expensive because they are needed in rectifier and inverter circuits. In addition, since power electronics elements are used, it will cause harmonic increase on the line. A suitable filter needs to be designed to solve this problem.
- Disconnection of direct current in HVDC transmission lines is more difficult.
- Since power electronics circuits are used, control systems are complex and require expertise.
- It can be set up between two points. No addition can be made to the desired point of the line.

3. HVDC TRANSMISSION LINES

3.1. The Development of HVDC Transmission Lines in History

HVDC transmission lines are generally less costly than HVAC for transmission distances of more than 600 km (and power above 1000MW) (Figueroa-Acevedo *et al.*, 2015). In cases where the HVDC power transmission is up to 600-800M, approximately 300 km distances have been reached. Underwater cables and cable lengths up to approximately 1000 km are in the planning phase. As mentioned earlier, HVDC power transmission technology over long distances was introduced in the second half of the last century. From initial installations that allow less than 100MW of power transmission, the transmission capacity is

constantly increasing towards higher values (Mazzanti and Marzinotto, 2013). In order to overcome the technical limitations on reactive power demand of HVAC cables for long distances, the first commercial applications of HVDC transmission are produced, especially in underwater transmission. Later, HVDC has been applied for long-distance air lines and it has been found that it offers cost-effective solutions compared to HVAC technology as the transmission distance increases. Moreover, it is seen that the lower cost structure of HVDC compared to HVAC has played an important role in the development of HVDC transmission lines over time.

When important projects in the first period developments of HVDC are examined, it is seen that a 115 km long underground cable system, providing 60MW power with 200 kV voltage value and 150A cable amp, to Berlin, Germany was ready to be energized in 1945 but it was never employed due to the events related to World War II. In 1952, a transmission line of 110 kV was constructed in China by her own technologies (Tiku, 2014). In 1954, 220 kV Fengman-Lishizhai line was constructed. In 1956, the Kuybyshev-Moscow transmission line became operational in the Soviet Union, making it the world's first application of 500 kV in transmission (Ukil, 2015). In 1965, the World's first 735 kV transmission line, between Quebec City and Montreal, was completed. A 750 kV pilot transmission line in the Soviet Union and a 765 kV transmission line in the United States were constructed in 1967 and 1969 respectively.

It is observed that the power capacity and transmission line lengths have increased with the developments in the first period of HVDC as it is happening today. For instance, Sardinia Peninsula Italy (SAPEI) HVDC interconnection is a bipolar system used for 1000MW transmission over 440M cable length, which is known as the longest project in the world as of today. It connects Fiumesanto, which is 1650 m below sea level in the Tyrrhenian Sea, to Sabotino (Mazzanti and Marzinotto, 2013).

3.1.1. Development of HVDC Transmission Lines in the World

When the geographical distribution of HVDC transmission systems in the world is examined, it is seen that the Asian continent takes the first place. Many HVDC projects, especially in this continent where China and India are located, have been built in order to provide efficiency in the transmission of energy to long distances because of the geographical width of those countries. Especially in China, it is seen that the current connections exceed 10000MW. It is seen that Asia has the largest average transmission voltage since most of the HVDC connections established after 2010 have been ± 800 kV, which has increased recently. The European continent follows the Asian continent in the configuration of the HVDC projects. However, considering the demand and geographical differences of HVDC connections in Europe, it is seen that higher power and longer distances are not required compared to the Asian continent and 1.1 GW cross-border connections are dominant (L'Abbate *et al.*, 2015). Asia and Europe are followed by North America with 1.5 GW capacity, South America with 1.4 GW capacity and other regions with 1.0 GW capacity, in order (Alassi *et al.*, 2019). When the geographical distribution of the maximum voltage reached in HVDC transmission line systems is examined, the continent of Asia with the highest voltage transmission (1100 kV) is followed by the continent of South America with 800 kV, the continents of Europe and North America with 600 kV, and other continents with 500 kV, in order (Liu *et al.*, 2018). When the market of HVDC transmission line systems in the world is analyzed, ABB, which has been providing service for 60 years, dominates more than half the market. Along with ABB, Siemens and Alstom Grid (General Electric since 2015) has emerged as other important service providers in the HVDC transmission line systems market. Some projects with HVDC transmission line systems in the world are summarized in Table 1 (IEEE, 2006).

Table 1. Summary of HVDC transmission line projects in the world (1954-2019).

Project	HVDC Provider	Service	Year	Power (MW)	DC Voltage (kV)	Line/Cable (km)	Country
GOTLAND I	ASEA		1954	20	±100	96	Sweden
SQUARE BUTTE	GENERAL ELECTRIC		1977	500	±250	749	USA
NELSON RIVER 2	AEG/BBC/SIEMENS		1978	900	±250	940	Canada
GOTLAND II	ASEA		1983	130	150	100	Sweden
NELSON RIVER 2	AEG/BBC/SIEMENS		1985	2000	±500	940	Canada
GOTLAND III	ASEA		1987	260	±150	103	Sweden
GESHA (GEZHOUBA-SHANGHAI)	ABB/SIEMENS		1990	1200	±500	1046	China
RIHAND-DELHI	ABB/BHEL		1991	750	500	814	India
RIHAND-DELHI	ABB/BHEL		1992	1500	±500	814	India
SKAGERRAK III	ABB		1993	500	±350	240	Norway-Denmark
BALTIC CABLE	ABB		1994	600	±450	261	Sweden-Germany
KONTEK	ABB/NKT CABLES		1995	600	400	171	Denmark-Germany
CHANDRAPUR-PADGHE	ABB		1998	1500	±500	736	India
GOTLAND HVDC LIGHT	ABB		1999	50	±60	70	Sweden
SWEPOL LINK	ABB		2000	600	±450	254	Sweden-Poland
DIRECTLINK	ABB		2000	3 × 60	±80	59	Australia
GRITA	PIRELLI/ABB		2001	500	400	316	Greece-Italy
TIAN-GUANG	SIEMENS		2001	1800	±500	960	China
NELSON RIVER 1	SIEMENS		2001	1854	±463	890	Canada
CROSS SOUND	ABB		2002	330	±150	40	USA
MURRAYLINK	ABB		2002	200	±150	176	Australia
EAST-SOUTH INTERCONNECTOR	SIEMENS		2003	2000	±500	1400	India
THREE GORGES-CHANGZHOU	ABB/SIEMENS		2003	3000	±500	860	China
THREE GORGES-GUANGDONG	ABB		2004	3000	±500	940	China
GUI-GUANG	SIEMENS		2004	3000	±500	936	China
BASSLINK	SIEMENS		2006	500	400	360	Australia
GUIZHOU-GUANGDONG 2	SIEMENS		2008	3000	±500	1225	China
TRANS BAY	SIEMENS		2010	400	±200	88	USA
XIANGJIABA-ŞANGAY	ABB		2010	6400	±800	2000	China
SAPEI	ABB		2011	1000	500	435	Italy
BLACK SEA TRANSMISSION NETWORK	SIEMENS		2013	2x350	96	283	Georgia-Turkey
INELFE	SIEMENS		2015	2x1000	±320	64	France-Spain
DOLWIN1	ABB		2015	800	±320	165	Germany
WESTERN YGDA LINK	SIEMENS		2016	2200	±600	422	England
MARITIME LINK	ABB		2017	500	200	360	Canada
CAITHNESS MORAY YGDA LINK	ABB		2018	1200	±320	160	Scotland
BORWIN3	SIEMENS		2019	900	±320	200	Germany

Source: (IEEE, 2006).

It is known that the increasing prevalence of HVDC transmission line systems in the world is due to their technical, economical and environmentally superior features compared to HVAC. Considering the past, present and future of HVDC, it is predicted that its technological, economic and environmental superiorities will come to the fore respectively (Figure 1) (Long and Nilsson, 2007).

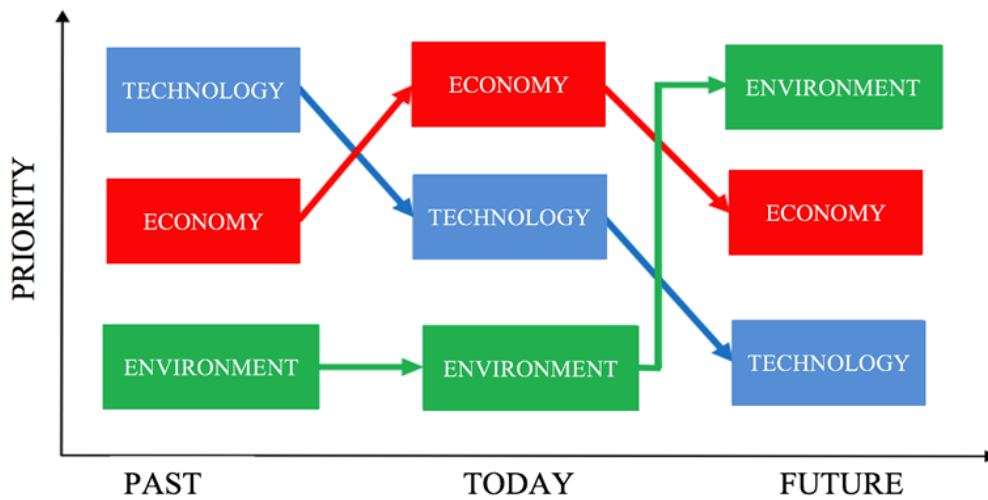


Figure 1. Vision of HVDC transmission line systems (Long and Nilsson, 2007).

Considering the area covered by the transmission lines, the area cost of the HVDC line is not as high as that of an AC line. This also reduces the visual impact. In HVDC systems, environmental issues such as visual impact, audible sound, electromagnetic compatibility, and the use of ground or sea return path in mono-polar application are important for converter stations. It can be said that the HVDC system is highly compatible with any environment and can now be integrated into the system without causing any environmentally important issues (Bahrman, 2006).

3.1.2. The Development of HVDC Transmission Lines in Turkey

To meet the constantly growing demand for electricity in Turkey, the development of transmission lines with technical economic and environmental advantages should accelerate. In this context, the connection of Turkey's electricity system to (ENTSO-E CESA) system, which is started in 2005, in a synchronous parallel way was carried out as of April 15, 2015. With this treaty, steps have been taken to realize synchronal connection structures with neighboring countries other than our western neighbors. In 2016, ENTSO-E CESA observer membership agreement is signed and Turkey became the first and only observer. 2019 is the last year for observer membership and negotiations are still ongoing. Since it is predicted that neighboring countries such as Georgia, Iran, Iraq and Syria will not be able to meet ENTSO-E standards in the near future, the applicability of HVDC transmission line systems with these countries seems possible to the extent permitted by ENTSO-E standards. The existing interconnection lines in Turkey as of 2018 is located in Figure 2 (TEİAŞ, 2016).

According to TEİAŞ data, electricity is imported by the isolated region method from Iran. The efforts to transform this transfer to asynchronous connection with back-to-back connected HVDC system started gradually (from 500-600MW to 1000-1200MW) as of 2016. The fact that HVDC systems allow asynchronous structure is important in terms of facilitating the exchange of power and enabling the expansion of the electricity trade volume between countries. In this context, for our country, Georgia started to use the back-to-back connected HVDC system in Ahiska and enabled the transfer of electricity into an asynchronous parallel connection. It is seen that they accelerate their work for new connections. Apart from these developments, the interconnected project of our country with 8 countries (Egypt, Jordan, Lebanon, Libya, Iraq, Palestine and Syria) continues (TEİAŞ, 2018).

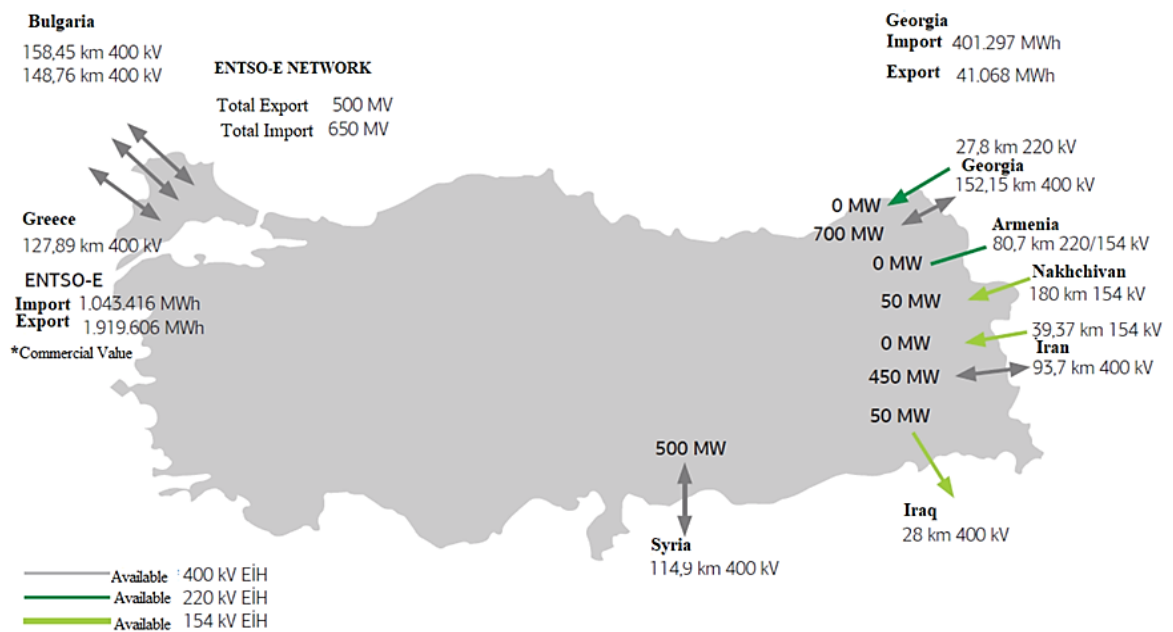


Figure 2. Interconnected lines, transportation capacity, and import-export values in Turkey (TEİAŞ, 2016).

It is thought that the HVDC connections to be established with the countries especially in Figure 2 will contribute to the economy of the country by reducing the transmission losses and minimizing the costs at the long distance. The first of the two-national level HVDC projects on the agenda is the electric power transmission line from Akkuyu Nuclear Power Plant and the other is an HVDC transmission line planned for Cyprus. A possible Akkuyu-Istanbul HVDC transmission line will consist of 4 units each with 1200MW power and it is expected to have 4800MW power. It is seen that HVDC systems are the most efficient solution for transmitting to Istanbul, where demand is high. Here, thyristor based HVDC systems or IGBT based HVDC systems are applicable. However, the technologies used here need to be analyzed well.

Before installing the HVDC system in Turkey, it is necessary to create a road map that identifies the possible future establishment of other HVDC system. Thus, the first project to be established needs to be developed accordingly. Otherwise, integration of HVDC stations to be installed, later will be a problem. When these scenarios are considered, a master plan covering all of them should be made. In line with the plan to be created, projects should be developed step by step. It is predicted that an HVDC transmission line between Istanbul and Akkuyu can form the backbone of such a scenario. It is thought that if every HVDC station to be installed in the future creates a DC network integrated to its installed stations, this will both increase the stability of the network and enable the use of energy resources more efficiently.

3.2. HVDC Transmission Line Configuration

The HVDC transmission system configuration, which is more advantageous than HVAC in terms of cost and transmission losses, has various components. These components can be listed as follows (Haugland, 2008):

- Converter station
- AC-DC filters
- Smoothing Reactors
- Reactive Power Source
- Reactor Inverter

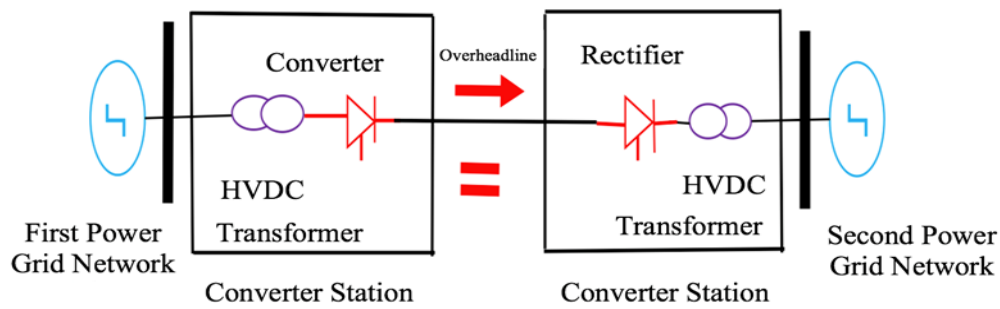


Figure 3. The configuration of the HVDC transmission line (Haugland, 2008).

Direct current configuration can be generally classified as mono-polar, bi-polar and homo-polar system as shown in Figure 4 (Haugland, 2008). In the mono-polar DC systems only one conductor (positive or negative end) is used. This configuration is often used as the first step of the DC link until the load requires upgrading to the bipolar link. Konti-Skan (1965) and Sardinia-Italy (1967) projects are examples of single circuit links. In bipolar DC current systems, which are known as the most common configuration type, two conductors (positive and negative) are used with the same voltage (Zangana and Erçelebi, 2016; Yidong and Yu, 2013). There are sets of equal level converters in series link that increase the power transmission capacity on the DC side of each terminal. The grounded link between the converters is at one or both ends. Under the standard operation condition, the currents are the same in both poles and there is no ground current (Sood, 2004; Brenna *et al.*, 2016).

Apart from the mono-polar and bipolar system in DC configuration; homo-polar, back-to-back, and multi-terminal system configurations are also included. In the homo-polar configuration, two conductors with the same end (usually negative) can be operated with a ground or metallic return (Sood, 2004). Besides, the back-to-back configuration, is often used to connect the asynchronous AC system. Inverter stations are located in the same place and no transmission line or cable is required. Argentina-Brazil interconnection is an example of such system configuration. HVDC converter stations in a multi-terminal configuration, are geographically separated by cables and transmission lines (Cotts, 2017). In this configuration, converter stations are connected to the same voltage or more converter stations are connected parallel in terms of one or both two poles in series. Sardinia-Corsica-Italy (SACOI) Pacific Intertie and Hydro Quebec links in USA are examples for the multi-terminal HVDC systems applications (Hausler, 1999; Kamalapur *et al.*, 2014). HVDC transmission line link systems have advantages and disadvantages against each other. The advantages and disadvantages of the link systems are summarized as follows in Table 2.

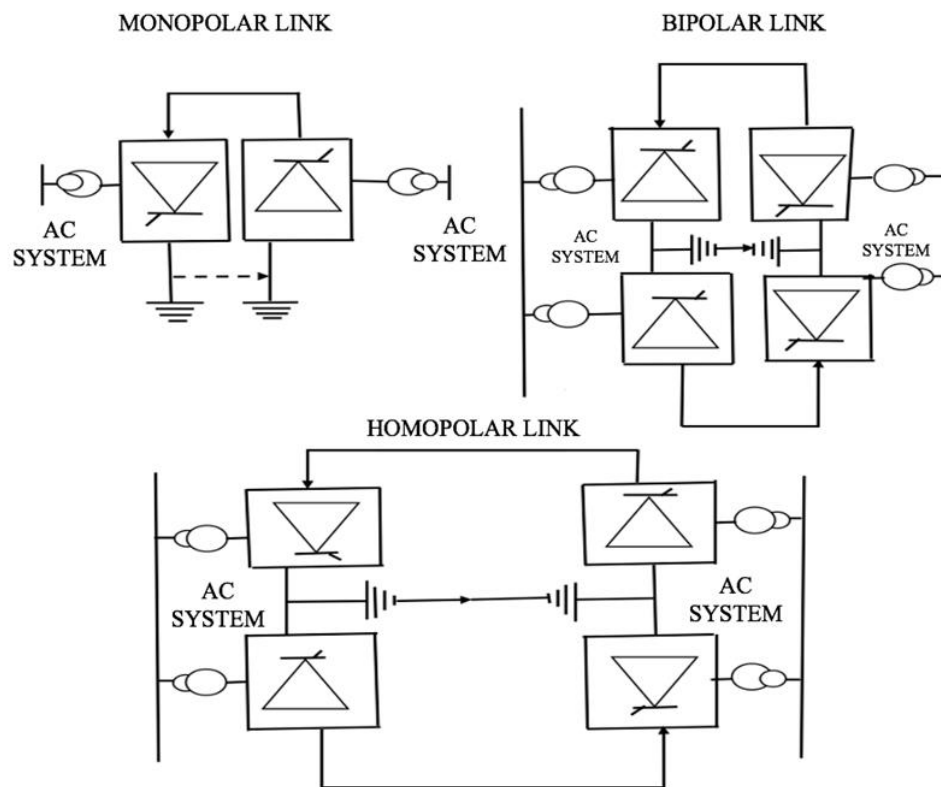


Figure 4. Different configurations for HVDC transmission lines (Haugland, 2008).

Table 2. HVDC Advantages and disadvantages.

	Advantages	Disadvantages
Monopolar System	<ul style="list-style-type: none"> • The corona effect is less. • Less conductor materials are required for using the ground as a return path. • Less insulation is required. 	
Bipolar System	<ul style="list-style-type: none"> • The power transition power transition capacity is twice as the mono-polar systems. • When a fault is occurred in one conductor, the half power continues from the other conductor. 	<ul style="list-style-type: none"> • The terminal equipment costs are high. • More conductor materials are required. • The corona effect is much higher.
Homo-polar System	<ul style="list-style-type: none"> • The corona effect is less for the reason of negative polar conductors. • More less conductor materials are required for using the ground as a return path. • Failures caused by malfunction can be prevented as transmission can be provided from other conductors. • High reliability. • Less investment costs. 	<ul style="list-style-type: none"> • The ground return path causes metallic wear. • It causes noise in the underground communication cables.

Source: (Haugland, 2008).

3.2.1. Converters

The HVDC System converts the electrical current from AC to DC at the transmission end and DC to AC at the receiving end. The important component of this system is electronic converters, which can be classified into two main types of Line-Commutated (LCC) and voltage source converter (VSC). Possible circuits for the HVDC converters and comparison between LCC and VSC can be found in Figure 5 and Table 3.

LCC (line commutate converter) and VSC (voltage sourced converter) HVDC:

The figures below show the LCC (current sourced Line-commutated) and VSC (Voltage sourced self-commutated) circuits used in HVDC transmission lines.

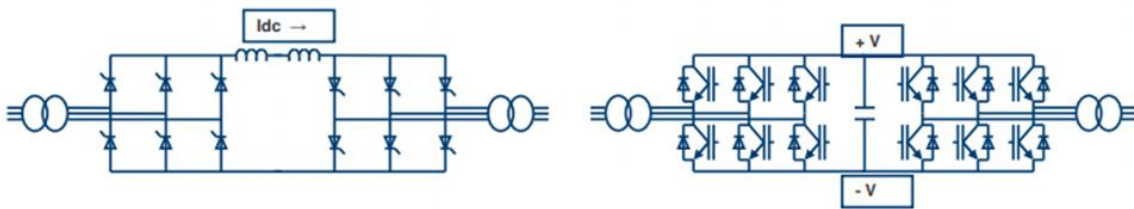


Figure 5: a) LCC circuit b) VSC circuit

The selection of HVDC technology type varies depending on the amount of power transmitted, the degree of control required and the price. LCC is a mature technology used for a long time. VSC is still in the development stage with a potential for improvement. Due to the equipment at the conversion station VSC is more expensive. VSC conversion stations have higher losses than LCC. Mircea and Philip (2017), by comparing the LCC and VSC conversion stations, LCC have lower losses (0.5-1%) than VSC (1.8-3%). Technical comparison of LCC and VSC shown in Table 3:

Table 3. Technical comparison of LCC and VSC.

LCC HVDC	VSC HVDC
High power capacity	Low power capacity
Good overload capacity	Poor overload capacity
Creates harmonic distortion (AC and DC harmonic filter required)	Negligible harmonic generation (No filter required)
Requires converter transformer	Conventional transformer is used
Low station cost	High station cost
High reliability	Lower reliability due to the high number of components
More mature technology	less mature technology
Low in cost	High Cost (10-15%)

Source: (Mircea and Philip, 2017).

Since there is no grounding, VSC technology is bipolar by nature. The disadvantage is that in the event of a malfunction or during periods of maintenance, the systems must be shut down completely without the possibility to disconnect the current from another pole and at least partially resume operation (Table 4). It is not currently possible to talk about VSC-HVDC interconnection which is has a long distance and a high capacity. However, this technology is thought to be able to compete with the classic HVDC in the coming years (Mircea and Philip, 2017). The choice of DC configuration is basically affected by the needed reliability, ratings, cost effectiveness and compliance with local policies and regulations. They are commonly used mono-pol and bipolar connections of HVDC transmission systems. Homo-polar

connection types are rarely applied and mostly depend on the designs of other common. In contrast, to connect unsynchronized AC networks back-to-back configurations is preferred. For example, the Al-Fadhili project launched in 2009 to connect the Saudi Arabia system to neighboring markets (Kuwait, Qatar and Bahrain) with a total capacity of 1800 MW (Macleod *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014). Projects with current configuration data in the world reveal that 33% are structured in B2B style. In most of these B2B connections, LCC converters are more widely used than VSC converters, as the LCC has less power loss (Van Hertem and Ghandhari, 2010).

Table 4. The comparison of converter types.

	LCC	VSC
AC	The energy storage device needs (capacitor). Needs large AC filters. Reactive power supply is required for power factor correction.	The energy storage device needs (Inductor). Needs small AC filters. No power supply is required.
DC	Requires energy storage device (Inductor). Requires DC filter. Provides natural fault current limiting feature.	Requires energy storage device (capacitor). The energy storage capacitor provides DC filtering without paying additional cost. As the charged capacitor will work the problematic fault is discharged in DC line side faults.
Switching	Switching takes place at the line frequency.	Switching takes place at high frequency.

Source: (Sood, 2004).

The converter transformers according to the winding connections are as follows: I) single-phase, three windings. II) three-phase, three windings. III) single-phase, two windings. IV) three-phase, rotation. Transformer type directly affects transport size and convenience as an important selection criterion. High-level transformers are physically huge for high- powered applications and are impractical to carry to the field. Instead, option (III) is benefited frequently in HVDC applications since transformers are linked to three-phase arrangements at the station and maintain acceptable phase balancing and are easier to transport, which makes it easy to add replacement transformers on site at an acceptable cost for raised system reliability (Bancal, 2015). The properties of the converters used in HVDC and HVAC transmission lines are shown in Table 5 (Haugland, 2008).

Table 5. Comparison of HVAC and HVDC transmission system converter.

	HVAC	HVDC LCC	HVDC VSC
Maximum usable capacity	at 400 kV 800 MW at 220 kV 380 MW at 132 kV 220 MW all up to 100 km	up to 600 MW (submarine transmission)	Installed up to 350 MW, 800 MW is being developed.
Voltage level	132 kV installed 220 and 400 kV are being developed.	800 kV and above	±300 kV
Black-start functionality	Yes	No	Yes
Maintenance requirements	Low	High	Medium
Cable model	Resistance, reactance	Resistance	Resistance
Installation costs	Low for station (only transformer) High cost for cable	High cost for station Low costs for cable	The station is 30-40% more expensive than LCC.
Equipment costs	It is expected to be less than 75km. Reactive compensation and resulting platform cost increase for higher distance and power.	Similar to VSC but additional cost for reactive compensation and less compact, thus higher platform costs	Recently, VSC costs have become similar to LCC costs. VSC is more compact, so the platform cost is lower.
Power loss	The losses from the cable are directly proportional to the distance	Approximately 3.3% conversion losses and cable losses proportional to distance	Approximately 1.5% conversion losses and cable losses proportional to distance

Source: (Ackerman, 2005; Raza *et al.*, 2017).

3.2.2. Filters (AC-DC)

Related with AC and DC filters, AC filter is linked to AC side of converter transformer and DC filter is linked to DC side in the same way. While the purpose of the use of AC filter is to prevent harmonics and high frequency components entering the system, DC filters prevent the inference of harmonic voltages in the transmission line where the currents overlaps and create noise (Ai and Tin, 2014). If they are not filtered, cause capacitors and adjacent generators to overheat.

3.2.3. Converters (VSC Thyristor)

Conversion between AC-DC and DC-AC is provided by converter valves. Thyristor consist of valve bridges and step-changing transformers. Valve bridges consist of six pulse or twelve pulse valves depending on the arrangement. The converter transformer supplies an ungrounded 3-phase voltage source to the value bridge. When the value samples are examined, mercury arc value, thyristor value and VSC valve appear. In VSC value thyristor, current harmonics on the AC side are directly related to the PMW frequency, as it must compensate for any reactive power consumed by it. Thus, it significantly reduces the amount of filter required (Kundur, 1994; El-Saady *et al.*, 2016).

3.2.4. Reactive power source

Reactive power supply, which is important for maintaining voltage balance in a large-scale transmission system, is used to meet the reactive power requirement, develop voltage profiles and reduce network loss. The converter stations absorb reactive power during operation. The reactive power absorbed in the stationary operation is approximately 50% of the transmitted active power. This percentage raises under temporary conditions and thus reactive power supplies are normally provided near transducers (Kundur, 1994; Machado *et al.*, 2015).

3.2.5. Electrodes

To provide a neutral connection to ground and reduce current densities, large surface conductors are normally employed. Conductors connected in this way are called electrodes. However, it is recommended to limit the current flow in the world, and therefore metallic return conductors are used for this purpose (Azimoh, 2010).

3.2.6. Corrective Reactor

The smoothing reactor placed on the DC line reduces the fluctuations in the DC current and prevents current leakage in case of failure (Gamit *et al.*, 2015). The functions of these high inductance large reactors can be listed as follows:

- Reduce peak current of the rectifier in the DC line faults.
- Prevents commutation failure.
- Decreases the harmonics in DC line.

4. TECHNICAL AND ECONOMIC PERFORMANCE EVALUATION OF HVDC

HVDC transmission systems have many advantages in terms of cost and transmission losses against HVAC systems as far as long-distance transmission line is concerned (Okba *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2017):

- Simple and smaller transmission towers.
- Narrower right of way
- Requires only one-third of the isolated conductor sets as double-circuit AC lines.
- Operated independently of each conductor circuit.
- No charge current exists in steady state.
- Less loss since there is no skin effect.
- No reactive compensation required.
- Distances are not limited to stability.
- Short circuit current is very low.
- It does not contribute to the short circuit current of an AC system.
- For underground or submarine cables, there are no physical restrictions that limit the distance or power level.

4.1. Technical Performance Assessment of HVDC

The fast-controllable structure of HVDC transmission lines provides an advantage in providing full control over the transmitted power. The DC line connected to AC increases the transmission and dynamic stability of the line. The angle difference between the voltage phasor at the beginning and end of an AC line affects power transfer. As the distance increases, the increasing angle difference limits the stability of the transient states for maximum power transmission. Power carrying capacity in line AC

varies with inverse proportion depending on the length of the line. DC lines are capable of carrying power regardless of the length of the line. Voltage control on the AC line is more difficult than on DC lines. The reason for this is that reactive power is required as the load on the line increases to provide constant voltage at the beginning and end of the line. Whereas DC lines themselves do not need reactive power control directly (Barthold, 2006; Kharade and Savagave, 2017; The Crown Estate, 2008). For the increase in power transfer and voltage control in long AC transmission lines, static VAR compensator (SVC) and static compensator of the shunt reactor and serial capacitor are required, while such compensations are not required from DC lines. High ground impedance in AC, both effects the efficiency of power transfer and causes interference. Whereas in DC, the ground impedance can be neglected by using a single conductor with mono-polar link system. Even when working with mono-polar link in DC transmission line systems, the AC network feeding the DC converter station operates with balanced currents and voltages. In this case, a single-phase system in AC cannot be implemented for more than one second, while, long-term operation can be achieved even with a single pole in DC (Mircea and Philip, 2017).

4.1.1. Cables

When the applicability of DC lines is examined; in case of using long cable links exceeding approximately 40-50 km break-even distance, DC cable and energy transmission system is advantageous compared to AC cable link system. In recent years, the use of VSC and durable polymer DC cables has become increasingly common.

Large power transmission over long distances creates an economic advantage over AC when breakeven point is exceeded. Projects starting from the Pacific link line to China and India can be exemplified in this sense. Due to the impact of developments in power electronics switching systems, in the development of new compressed converters, which decreases the costs appears to have reduced the break-even point for DC link. Load flow control of AC connections is difficult in large interconnected connections. This difficulty is overcome thanks to the fast control power and time-dependent overload capacities of the DC (Sood, 2004).

High-voltage AC cables have much greater shunt capacitance than overhead transmission lines per km. For long distances, the capacitance grows and the reactive current required to charge the cable approaches the rated current, leaving less current capacity to transmit active power, causing the cable to decelerate. Over a certain distance, real power transmission becomes impossible. Shunt capacitance of an AC cable must be met by distributed balancing across the cables. However, this is not possible in marine transmission and shunt reactors or STATCOMs are used at both ends (Normark and Nielsen, 2005).

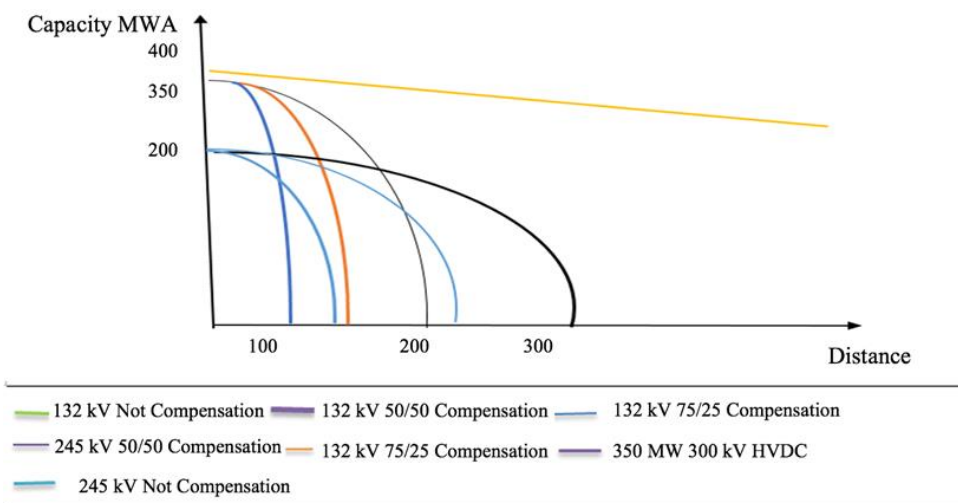


Figure 6. HVAC and HVDC cable comparison (Sood, 2004).

DC cables, on the other hand, do not produce or consume any reactive power and their active power capacity almost does not damage the distance. In addition, AC cables have insulator losses and skin effect unlike DC cables. Economically, DC cables are less costly than AC cables with the same voltage and power rating. When using an AC cable, the change in the reactive consumption of the cable with the transmitted power is a problem. Cable operation will be at a relatively stable operating point, if it can be compensated before reaching a point where the transfer capacity of the cable is fully utilized (Mirebeau and Syrtveit, 2015; Ye *et al.*, 2018).

There are two types of cables commonly used in HVDC transmission line systems. The first one is Mass Impregnated (MI) cables. This cable system was first used in 1954 at 100 kV HVDC project in Gotland, Sweden (ABB, 2014). The insulation system of MI cables can be described as lapped paper tapes impregnated with an adhesive, oily compound. This cable system can be used with both VSC and LCC converters. Extruded HVDC cables are another type of DC cable that is more sustainable and flexible alternative to MI cables. This type of cable was initially used in HVDC transmission line systems in 1999 (Bergelin *et al.*, 2017). In extruded HVDC cables, the insulation material is based on cross-linked polyethylene (XLPE). Therefore, these cables are called XLPE cables. XLPE cables are employed mainly in VSC-HVDC links since they tend to fail because of excessive DC voltage, as opposed to power flow when used in LCC-HVDC links. The advantages of XLPE cables compared to MI cables can be listed as follows (Gu *et al.*, 2018; Zeng *et al.*, 2018) and seen in Table 6:

- Easy to carry, low weight and design flexibility.
- Mechanical strength.
- Fast production process.
- Being environmentally friendly without using recyclable materials.

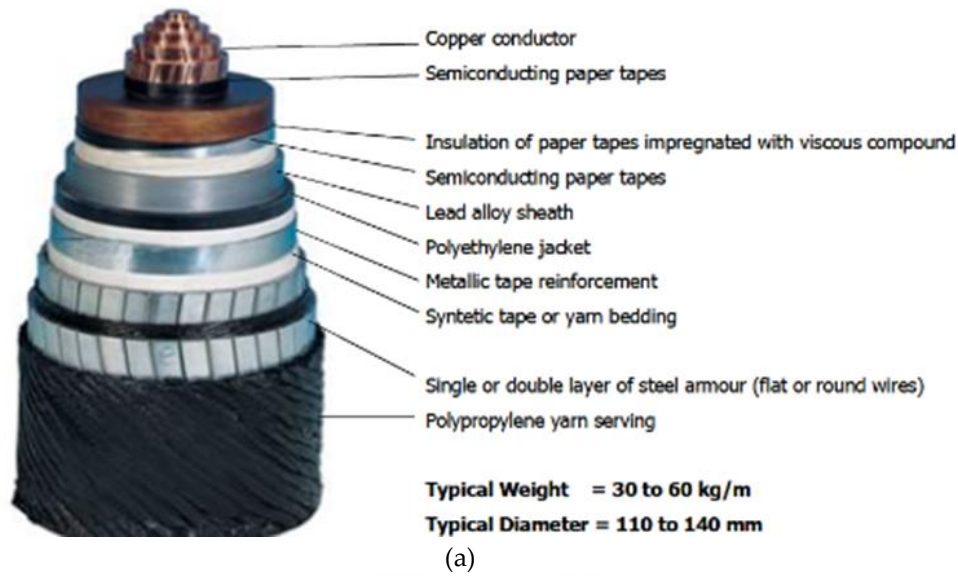
Considering the advantages of XLPE cables over MI cables, it is expected that HVDC will have a major stake in the transmission line systems market in the future.

Table 6. Comparison of XLPE and MI cable technologies.

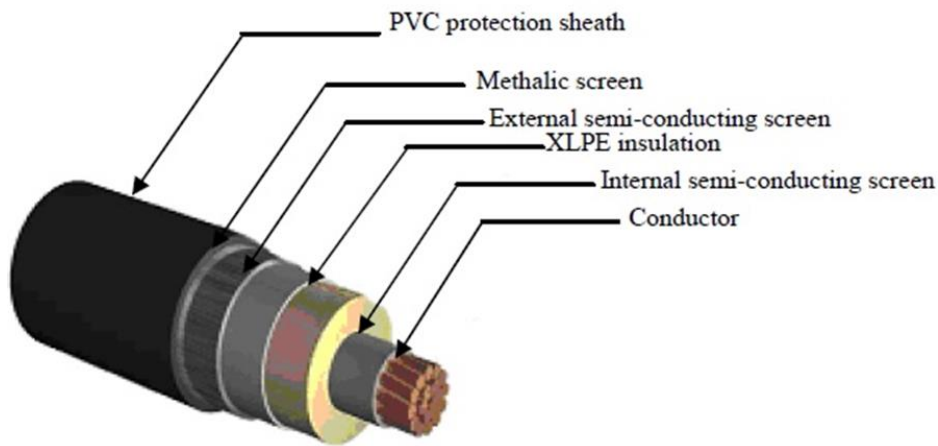
Cable Type	MI	XLPE
Isolation Type	Paper/Oil	Polymer
First Use in HVDC	1954	1999
HVDC Application	LCC/VSC	VSC
Mechanical Weight/ Isolation	High / Hard	Low / Soft
Longest Distance	580km	400km
Maximum Power	2200MW/±600kV	2000MW/±320kV

Source: (Pipelzadeh *et al.*, 2015; Francos *et al.*, 2012; Murata *et al.*, 2013; Mokhberdorran *et al.*, 2017; Vrana and Energi, 2016).

Figure 7 shows the specification of MI and XPLE cables that used in a HVCD line.



(a)



(b)

Figure 7. a) MI cable. b) XPLE cable.

Insulators Used in Overhead Lines: Different types of insulators are used in overhead lines according to the voltage value.

Pin Type Insulator: This insulator is used in transmission or distribution networks up to 33 kV. Insulator can be one piece, two pieces or three pieces, depending on the voltage level. At voltages higher than 33 kV, it is very difficult to make a single piece of porcelain due to the increase in insulator thickness. In this case, a multi-piece pin type insulator must be designed. Figure 8 shows the 33 kV pin type insulator.



Figure 8. 33 kV Pin type insulator

Post Type Insulators: Post insulators are used for higher voltages compared to pin insulators. Especially in high or medium voltage lines, this type of insulator is highly preferred. These insulators are the group A that specified in IEC 60383, in other words, they are puncture-proof Air Line Support Insulators. This insulator has more combinations and is much higher. Post insulators can be mounted horizontally and vertically on the supporting structure. Figure 9 shows the post type insulator.



Figure 9. Post type insulator

String Insulators: These types of insulators are used to fix the conductor in medium and high voltage energy transmission and distribution lines by hanging or stretching the conductor. Insulators in the production program are divided into groups shown below.

- Normal type chain insulators with ball and socket joint
- Chain insulators used in dirty areas (fog type) with ball and socket joints

These types of insulators are connected together in series to form a string and the line conductor is carried by the lowest insulator. Because of its disc type shape, each insulator of a suspension rope is

called a disc insulator. A very high level of mechanical strength and electrical insulation properties are required in string insulators.



Figure 10. String type insulator

4.3. The Evaluation of Economic Performance

When HVAC and HVDC are compared economically, we encounter with three cost components:

- The terminal cost
- The line cost
- The Losses cost

The total cost is divided into two as the cost to establish the infrastructure and the cost to run the system when it becomes functional. It takes into account investment cost, poles, conductors and insulations, converter stations and the right of way usage. The operating cost particularly includes losses expressed financially.

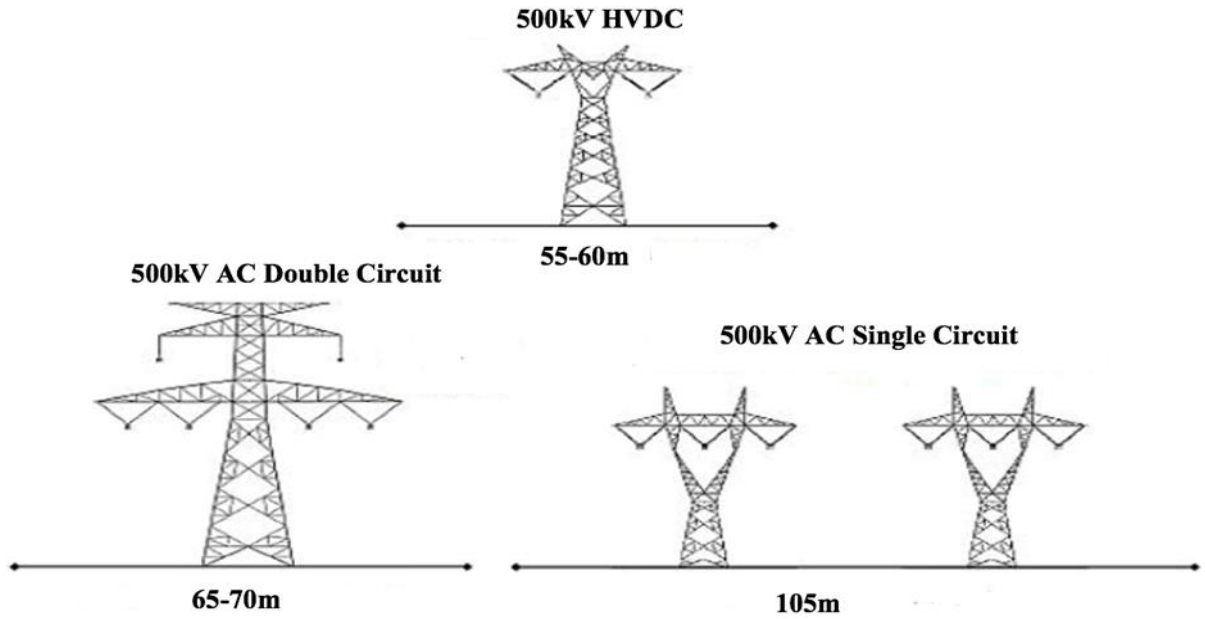


Figure 11. The comparison AC and DC right of way (ROW) (Mircea and Philip, 2017).

ROW size varies between AC and DC line. In particular, this difference creates a significant discrepancy in costs when crossing densely populated areas with high land value. Kumru and Arıkan (2020) suggest safe ROW distances. For the same power capacity, DC ROW can be half the width of AC (Figure 11). Assuming that the conductor and insulation types are the same for AC and DC, AC needs three conductors for the same voltage, while DC needs two conductors (Pletka *et al.*, 2014). Thus, DC poles turn into a narrower passageway which requires less material for conductors and insulators (Mircea and Philip, 2017). In addition, the fact that DC needs two conductors instead of AC needs three conductors, indicates that DC losses are 2/3 of the AC losses. Considering the very long mileage distances, losses in AC lines gain great importance. In Figure 12, AC and DC transmission line losses are calculated as follows (Kalair *et al.*, 2016; May *et al.*, 2016):

$$\text{Power transmitted by DC} = V_d I_d \quad (1)$$

$$\text{Power transmitted by AC} = 3V_a I_a \cos \theta \quad (2)$$

$$\text{DC power loss} = 2I_d^2 R \quad (3)$$

$$\text{AC power loss} = 3I_a^2 R \quad (4)$$

When the transmission losses of AC and DC in equations (3) and (4) are equalized, equation (5) is achieved.

$$2I_d^2 R = 3I_a^2 R \rightarrow \frac{I_d}{I_a} = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

When using DC instead of three phase AC, under the assumption of the same power transmission, the same conductor size and the same power loss;

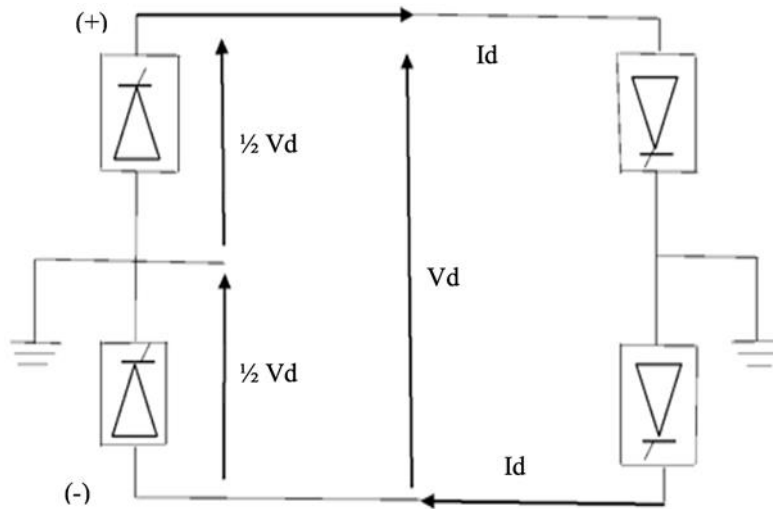


Figure 12. Conversion of three phase AC transmission line to DC transmission line (Kalair *et al.*, 2016; May *et al.*, 2016).

In case the power transmitted on both sides is the same, the number (6) is obtained.

$$3V_a I_a = V_d I_d \rightarrow \frac{V_d}{V_a} = 3 \frac{I_a}{I_d} = 3 \sqrt{\frac{2}{3}} = \sqrt{6} \tag{6}$$

Thus, the link between the AC installation level and the DC installation level is expressed in the equation number (7).

$$\frac{\text{AC Installation Level}}{\text{DC Installation Level}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{V_d}{V_a} = \frac{\sqrt{6}}{2\sqrt{2}} = 0.867 \tag{7}$$

When the 3-phase double circuit AC line is converted to 3-phase double circuit DC line, the relationship between the power transmitted by DC and the power transmitted by AC is expressed as equation (8).

$$\begin{aligned} \text{3-phase double circuit AC line power transfer} &= 2(3V_a I_a \cos \theta) \\ \text{3-phase double circuit DC line power transfer} &= 3V_d I_d \end{aligned}$$

$$\frac{\text{Power Transmitted by DC}}{\text{Power Transmitted by AC}} = \frac{3V_d I_d}{6V_a I_a} = \frac{3(2\sqrt{2}V_a)}{6V_a} I_a = \sqrt{2} = 1.414 \tag{8}$$

It is known that the diameter of the DC conductor is also different from AC. While AC uses only the peripheral part of the conductor, DC utilizes from the whole part of the conductor. Thus, with the same diameter conductor, DC conducts 30-40% more electricity than AC, and it is clear that DC has become more efficient than AC (Meah and Ula, 2006). The unit cost of electrical energy transmitted with increased efficiency is less for DC. As seen in Figure 13, the requirement for converters and filters causes DC systems to be more costly. Nonetheless, fewer losses in DC transmission compensate for this cost, especially in terms of long distance (Elliott *et al.*, 2015). In the AC and DC cost comparisons, it is seen that the break-even distance for break-even lines is 500-800 km (tending to fall 500-600 km) and 50 km less for submarine cables. While AC is profitable for short distances below the break-even distance, DC becomes profitable over the break-even distance for longer distances (Hur, 2012; EEP, 2014; Eltamaly *et al.*, 2017).

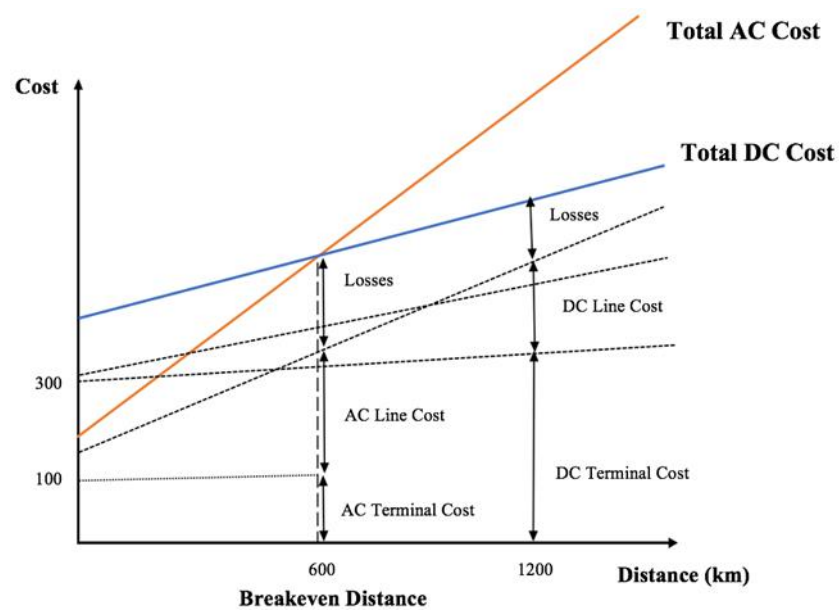


Figure 13. The cost comparison of HVAC and HVDC transmission systems (Elliott *et al.*, 2015).

Since conversion stations are very costly, initial investment costs are higher for DC systems. However, since it requires smaller number of conductors and simpler and lighter poles, DC is more advantageous than AC in terms of the cost of the transmission line, especially in long distances (Chen *et al.*, 2015). In addition, the fact that DC's losses are less than AC for long distances compensates for the first station cost that occurred at the beginning and DC appears as a less costly and efficient transmission system over time.

4.4. A Technical Comparison and Discussions

4.4.1. A Technical Comparison: Investment Costs of the Transmission System

The investment cost of the transmission system is separated into various components for both HVAC and VSC HVDC options which can be seen in the first column of the Table 7 (Van Eeckhout *et al.*, 2010). As it is seen from Table 7, the substation cost is higher for the VSC HVDC against HVAC due to the IGBT-based DC/AC converters (phase reactors, power electronics, filters, enclosed valves, transformers, etc.). A substation is required for both ends of the transmission cable in each technology. The price of the bipolar HVDC cable-pair for transporting the equal amount of active-power is less than the price of the two-parallel three-core HVAC cables. The DC cables do not require three phases in one cable, which makes them less complex, they have lower insulation and symmetry requirements, and they need less conductor surface of transported power per unit. The market price of cables is affected by the volatile characteristic of the price of copper.

Table 7. A comparison for the prices of the transmission systems for 300 MW offshore wind farm in Germany.

Item	HVAC	VSC HVDC
Substation (M€)	10	45
Cable (k€/km)	1500	600
Cable Installation (k€/km)	340	215
Offshore Substation Rig (M€)	13	24
Onshore Land Use (k€)	50	125

Source: (Van Eeckhout *et al.*, 2010).

The installation cost of DC cables is lower than the installation cost of AC cables. Moreover, their installation is easier due to the flexibility of the cables (single core vs. three-core) and they have thinner construction for the cable insulation. As a protection from the submarine environment both cable technologies are buried 1 meter deep in the seabed that is a general standard for undersea transmission protocol. The cost of substation platform which depends on the volume is assumed to be 1000 €/m³ for the offshore rig. The installation of a DC/AC converter needs more space than an AC station, leading a higher rig cost for the VSC-HVDC. On the other hand, the onshore land utilization is a minor transmission system cost that depends on the type of surface (Van Eeckhout *et al.*, 2010).

4.4.2. Discussions

Energy, an important indicator of welfare with its economic, social and environmental dimensions, is an important production input. Rapid population growth, urbanization, industrialization and production increase in the world are increasing the demand for energy day by day. It is very important for each country to determine a separate domestic and foreign policy for energy production and consumption in order to provide energy, which is in almost every area of our lives in the 21st century. Today, the dynamic nature of international balances and the asymmetric distribution of energy resources around the world bring with it the energy supply security problem for countries with high foreign dependence on energy. In world economies where efforts to increase economic welfare intensify, foreign dependence on energy is increasing in parallel with the production levels. The increase in foreign dependency on energy affects the economy negatively through causing an increase in the current account deficit, an important import item in the countries. For this reason, countries need to raise their current capacity and efficiency to reduce the foreign dependency on energy and to overcome the energy supply problem.

While developed countries often have sufficient economic power in terms of increasing existing capacity and energy efficiency investments, this may not be possible for developing countries due to economic difficulties. For this reason, it is thought that in developing countries obtaining high efficiency from their existing capacities will accelerate the studies about planned capacity increase. HVDC transmission line technologies have come to the fore in national and international connections among the steps taken in energy efficiency in recent years. Among the steps taken in energy efficiency in recent years, HVDC transmission line technologies in national and international connections have come into prominence. The rapid advancement of HVDC transmission line systems in the last five decades in the world is due to their technological and economic advantages compared to HVAC transmission line systems. It is seen that HVDC transmission line systems provide around 40% higher efficiency than HVAC transmission line technologies due to less cost and transmission loss. In Turkey, a developing country with a high dependency on foreign energy, HVDC transmission line systems are predicted to have a leading role in reducing dependency on foreign energy by ensuring energy efficiency. The agreement with an important service provider, ENTSA-E CESA, in the market of HVDC transmission line systems in Turkey is expected to accelerate the infrastructure operations of the HVDC transmission line systems. Thus, within the scope of 2019-2023 energy strategies, it is expected to create opportunities in terms of accessibility to energy at national and international level, energy efficiency and reduction of foreign dependency on energy.

5. CONCLUSIONS

In this study, the technological and economic superiorities of HVDC transmission line systems compared to HVAC transmission line systems and sample applications in the world are analyzed. In line with this framework, it presents the components, market structure, current situation in the world and in Turkey, and future trends of HVDC transmission line systems with a contemporary look. Findings obtained by examining the literature in detail can be listed as follows: LCC converters are widely used in HVDC transmission line systems compared to VSC converters in terms of available capacity. In cable

structures, XLPE cable is preferred more than MI cable. It is expected that, in HVDC transmission line systems, MTDA connections will have a crucial role in the future with their outstanding advantages over other connection types. When the geographical distribution of HVDC transmission line systems is examined, it is seen that the Asian continent is in the first place. The continent of Asia is followed by Europe, North America, South America and other continents respectively.

Although, there are studies that focus on the reduction of the size and cost of the HVAC systems (Özcan, 2018) and model the underground high voltage cables (Akbal, 2017), the national and international levels of HVDC transmission line system is still not a mature technology and is yet to be seen in the development stage in Turkey. Thereby, a technical comparison example is given for investment costs of the transmission system for 300 MW offshore wind farm in Germany. It is believed that HVDC transmission technology and related investments and ancillary services operating with renewable energy will be in Turkey in a close future.

The spread of HVDC transmission line systems worldwide due to low cost and high efficiency advantages over long distances is of great importance in terms of meeting the increasing energy demand and energy corridors that will be formed with international connections. It is thought that the development of HVDC transmission line systems, especially in countries that import a large part of its energy, will contribute to a reduction in imports due to increased efficiency and to decrease the import effect on the current account deficit indirectly. It is expected that having easy access to energy through international connections with the effect of decreasing costs and increasing efficiency will be facilitated in favor of price fluctuations in the international energy market. Considering the mentioned advantages, it is thought that evaluating the effect of rapidly growing HVDC transmission line systems on energy demand in terms of cost and losses will be a solution for energy efficiency in countries with high foreign dependency on energy, particularly in Turkey. In addition, this assessment is important in terms of determining the opportunities of HVDC transmission line systems that are planned to be established in the future.

REFERENCES

- ABB, 2014, Review Special Report 60 Years of HVDC, <https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106103A8195&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Access Date: 12.04.2020.
- Ackerman, T., 2005, *Wind Power in Power System*, 2nd Ed. UK, John Wiley & Sons.
- Ai, P., Tin, T., 2014, "Design Implementation of 250kV HVDC Overhead Transmission System", *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, Vol.3, No.15, pp. 3223-3227.
- Akbal, B., 2017, "Forecasting Applications of the Sheath Current of High Voltage Cable with Artificial Neural Network Based Hybrid Methods", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Vol.23, No.2, pp. 119-125.
- Alassi, A., Banales, S., Ellabban, O., Adam, G., Maclver, C., 2019, "HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 530-554.
- Almgren, B., Urban, A., Dong, W., "A Survey of the Flashover Performance of HVDC Converter Station Insulators", *IEEE 1998 International Conference on Power System Technology*, Beijing, China, 516-519, 18-21 August 1998.
- Azimoh, L., C., 2010, *Investigation Into Voltage and Angle Stability of A Hybrid HVAC-HVDC Power Network*, Master Thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Bahrman, MP., "Overview of HVDC Transmission", 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, USA, 29 Oct-1 Nov 2006.
- Bancal, S., 2015, *Basic Design of An HVDC Interconnection in Brazil*, Master Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Barthold, L., O., "Technical and Economic Aspects of Tripole HVDC", 2006 International Conference on

- Power System Technology, Chongqing, China, 22-26 October 2006.
- Beerten, J., Gomis-Bellmunt, O., Guillaud, X., Rimez, J., Van Der Meer, A., Van Hertem, D., "Modeling and Control of HVDC grids: A Key Challenge for the Future Power System", IEEE 2014 Power Systems Computation Conference, Wroclow, Poland, 18-22 August 2014.
- Bergelin, P., Jeroense, M., Quist, T., Rapp, H., 2017, "640 kV Extruded HVDC Cable System". Technical Report, NKT Group GmbH.
- Bertling, L., Pramod, B., "On the Use of Reliability Test Systems: A Literature Survey", 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Michigan, USA, 1-9, 24-28 July 2011.
- Brask, M., 2008, Modelling of The Power System of Gotland Inpss/E With Focus on HVDC Light, Master Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Brenna M, Foadelli F, Longo M. "Fault Detection HVDC Systems Applied to Renewable Sources". 17th International Conference on Electronic. Belo Horizonte, Brazil, 16-19 Oct 2016.
- Burger, N., Tuson, P., 2005, "Loadflow Modelling of a 400 km 2000 MW HVDC Link", *Energize*, pp. 28-34.
- Cao, J., Cai JY., "HVDC in China", EPRI 2013 HVDC&FACTS Conference, Palo Alto, CA, USA, 28-29 August 2013.
- Chen, G., Hao, M., Xu, Z., Vaughan, A., Cao, J., Wang, H., 2015, "Review of High Voltage Direct Current Cables", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol.1, No.2, pp. 9-21.
- Cotts, BR., Prigmore, II. JR., Graf, KL., 2017, "HVDC Transmission for Renewable Energy Integration", in *The Power Grid*, Academic Press, 171-196.
- EEP, 2014, Electrical Engineering Portal, <https://electrical-engineering-portal.com/analysing-the-costs-of-high-voltage-direct-current-hvdc-transmission>, Access Date: 15.03.2020.
- Elliott, D., Bell, KR., Finney, S., J., Adapa, R., Brozio, C., Yu, J., Hussain, K., 2015, "A Comparison of AC and HVDC Options for the Connection of Offshore Wind Generation in Great Britain", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.31, No.2, pp. 798-809.
- El-Saady, G., Ibrahim, EA., Okilly, A., H., "Analysis and Control of HVDC Transmission Power System", 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). Cairo, Egypt, 27-29 December 2016.
- Eltamaly, AM., Sayed, Y., Elghaffar, ANA., 2017, "A Survey: HVDC System Operation and Fault Analysis", *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, Vol. 15, No.4, pp. 25-30.
- Figuroa-Acevedo, AL., Czahor, M., Jahn, DE., 2015, "A Comparison of the Technological, Economic, Public Policy, and Environmental Factors of HVDC and HVAC Interregional Transmission", *AIMS Energy*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-18.
- Francos, PL., Verdugo, SS., Álvarez, HF., Guyomarch, S., Loncle, J., "INELFE — Europe's First Integrated Onshore HVDC Interconnection", 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, California, 23-26 July 2012.
- Gamit, P., Shah, N., Wani, U., Patel, P., Mali, U., Chaudhari, A., 2015, "Comparative Analysis of HVDC and EHVAC", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 2, No. 9, pp. 1165-1171.
- Giraneza, M., 2013, High Voltage Direct Current (HVDC) in Applications for Distributed Independent Power Providers (IPP), Master Thesis, Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa.
- Gu, X., He, S., Xu, Y., Yan, Y., Hou, S., Fu, M., 2018, "Partial Discharge Detection on 320 kV VSCHVDC XLPE Cable with Artificial Defects Under DC Voltage", *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, Vol.25, No. 3, pp. 939-946.
- Haugland, P., 2008, "It's Time to Connect: Technical Description of HVDC Light® Technology", ABB Technical Report, Ludvika, Sweden.
- Hausler, M., "Multiterminal HVDC for High Power Transmission in Europe", CEPEX99 Conference, Poznan, Poland, March 1999.
- Hur, D., 2012, "Economic Considerations Underlying the Adoption of HVDC and HVAC for the

- Connection of an Offshore Wind Farm in Korea”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol.7, No.2, pp. 157-162.
- IEEE, 2006, DC and Flexible AC Transmission Subcommittee of the IEEE Transmission and Distribution Committee by the Working Group on HVDC and FACTS Bibliography and Records, <http://www.ece.uidaho.edu/hvdcfacts/Projects/HVDCProjectsListingDec2006.pdf> Access Date: 15.04.2020.
- Kalair, A., Abas, N., Khan, N., 2016, “Comparative Study of HVAC and HVDC Transmission Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.59, pp. 1653-1675.
- Kamalapur, GD., Sheelavant, VR., Pujar, A., Baksi, S., Patil, A., 2014, "HVDC Transmission in India", *IEEE Potentials*, Vol.33, No.1, pp. 22-27.
- Kharade, JM., Savagave, DNG., 2017, "A Review of HVDC Converter Topologies", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* , Vol. 6, No.2, pp. 1822-1830.
- Kotb, O., 2018, On Stability Enhancement in AC/DC Power Systems through Multi-Terminal HVDC Controllers, Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Kumru, CF., Arıkan, O., 2020, “Investigation of Line Displacement in Terms of Electrical Field Distribution and Safe Right of Way Distance in Energy Transmission Systems”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Vol.26, No.2, pp. 279-285.
- Kundur, P., 1994, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill.
- L'Abbate, A., Careri, F., Calisti, R., Rossi, S., Fulli, G., “Long-term HVDC Developments in the European Power System: The Baltic Case in GridTech Analysis”, 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, Latvia, 11-13 May 2015.
- Li, W., Shi, L., Yao, L., Zhao, Y., Jian, Z., Ni, Y., “Comparison of HVAC and HVDC Based Grid Integration on Wind Farm”, 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 20-22 October 2014.
- Liu Z., 2014, *Ultra-High Voltage AC/DC Grids*, 1st ed., Waltham, USA, Academic Press.
- Liu, Z., Zhang, F., Yu, J., Gao, K., Ma, W., 2018, “Research on Key Technologies in ± 1100 kV Ultra-High Voltage DC Transmission”, *High Voltage*, Vol. 3, No.4, pp. 279–88.
- Long, W., Nilsson, S., 2007, "HVDC Transmission: Yesterday and Today", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, No. 2, pp. 22-31.
- Machado, J., Neves, MV., Santos, PJ., "Economic Limitations of the HVAC Transmission System When Applied to Offshore Wind Farms", 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), Lisbon, Portugal, 24-26 June 2015.
- MacLeod, NM., Barker, CD., Kirby, NM., “Connection of Renewable Energy Sources through Grid Constraint Points Using HVDC Power Transmission Systems”, *IEEE PES T&D 2010*, Sao Paulo, Brazil, 8-10 Nov 2010.
- May, TW., Yeap, YM., Ukil, A., "Comparative Evaluation of Power Loss in HVAC and HVDC Transmission Systems", 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore, 22-25 November 2016.
- Mazzanti, G., Marzinotto, M., 2013, *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development*, Hoboken, New Jersey, JohnWiley & Sons, Inc.
- Meah, K., Ula, S., 2006, “Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems”, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 4, No.6, pp. 1-5.
- Mircea, A., Philip, M., 2017, “A China-EU Electricity Transmission Link”, *Assessment of Potential Connecting Countries and Routes*, EUR 29098 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Mirebeau, P., Syrtveit, V., "Review of HVDC Insulated Transmission Cables Technologies", *Jicable 2015*, 9th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, France, 21-26 June 2015.
- Mokhberdorani, A., Carvalho, A., Silva, N., Leite, H., Carrapatoso, A., 2017, “Application Study of Superconducting Fault Current Limiters in Meshed HVDC Grids Protected by Fast Protection

- Relays", *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 292-302.
- Murata, Y., Sakamaki, M., Abe, K., Inoue, Y., Mashii, S., Kashiyama, S., Katakai, S., 2013, "Development of High Voltage DC-XLPE Cable System", *SEI Tech. Rev*, Vol, 76, No. 1, pp. 55-62.
- Normark, B., Nielsen, EK., "Advanced Power Electronics for Cable Connection of Offshore Wind", *Offshore Wind Conference*, Copenhagen, Denmark. 26-28 October 2005.
- Okba, MH., Saied, MH., Mostafa, MZ., Abdel-Moneim, TM., "High Voltage Direct Current Transmission- A Review", Part I, in *Proc. EnergyTech., IEEE*, Cleveland, OH, U.S. 29-31 May 2012.
- Özcan, H., 2018, "Thermodynamic Analysis of an Ice Slurry Thermal Energy Storage System for Decreased Size and Cost of HVAC Systems", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Vol. 24, No.1, pp. 25-29.
- Pipelzadeh, Y., Chaudhuri, B., Green, TC., Adapa, R., "Role of Western HVDC Link in Stability of Future Great Britain (GB) Transmission System", 2015 *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Colorado, 26-30 July 2015.
- Pletka, R., Khangura, J., Rawlins, A., Waldren, E., Wilson, D., "Capital Costs for Transmission and Substations: Updated Recommendations for WECC Transmission Expansion Planning", *Western Elect. Coordinating Council, Black and Veatch Project*, Overland Park, KS, USA, Tech. Rep. Project 181374, 2014.
- Pudney, D., 2012, "A Review of HVDC in China", *Energize*, Vol.54, pp. 31-4.
- Raza, A., Shakeel, A., Tahzeeb, H., Hassan, M., 2017, "Economic Analysis for HVDC Transmission System in Pakistan", *International Journal of Control and Automation*, Vol.10, No.11, pp. 29-38.
- Rudervall, R., Charpentier, J. P., Sharma, R., "High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper", Presented at *Energy Week 2000*, Washington, D.C, USA, 1-17, 7-8 March 2000.
- Shuai, J., 2012, *Placing of VSC-HVDC Lines in a Meshed AC-Network*, Master Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland.
- Sood, VK., 2004, *HVDC and FACTS Controllers: Applications of Static Converters in Power Systems*, Boston, USA, Kluwer Academic Publishers.
- Stenberg, N., 2013, *The Impact of HVDC Innovations on The Power Industry*, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- TEİAŞ, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. 2016 Faaliyet Raporu, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/faaliyet-raporlari> Access Date: 15.03.2020.
- TEİAŞ, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. 2018 Faaliyet Raporu, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/faaliyet-raporlari> Access Date: 15.03.2020.
- The Crown Estate, *East Coast Transmission Network Technical Feasibility Study (2008)*, https://archive.uea.ac.uk/~e680/energy/energy_links/transmission/east_coast_transmission_network_technical_feasibility_study.pdf , Access Date: 25.03.2020.
- Tiku, D., 2014, "DC Power Transmission: Mercury-Arc to Thyristor YGDA Valves [History]", *IEEE Power Energy Magazine*, Vol.12, No.6, pp. 76-96.
- Träff , V., Lennerhag, O., 2013, *Modelling of VSC-HVDC for Slow Dynamic Studies*, Master Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Ukil, A., 2015, "Theoretical Analysis of Tuned HVAC Line for Low Loss Long Distance Bulk Power Transmission", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.73, pp. 433-437.
- Van Eeckhout, B., Van Hertem, D., Reza, M., Srivastava, K., Belmans, R. 2010. "Economic Comparison of VSC HVDC and HVAC as Transmission System for a 300 MW Offshore Wind Farm", *European Transactions on Electrical Power*, Vol.20, No.5, pp. 661-671.
- Van Hertem, D., Ghandhari, M., 2010, "Multi-terminal VSC HVDC for the European Supergrid: Obstacles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, No. 9, pp. 3156-3163.
- Vrana, TK., Energi, S., "Review of HVDC Component Ratings: XLPE Cables and VSC Converters", 2016 *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Leuven, Belgium. 4-8 April 2016.
- Xiong, J., Guo, J., Liu, Q., "The Application of HVDC Transmission in Shore Power Supply", 2017

- International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII), Wuhan, China, 2-3 December 2017.
- Ye, H., Fechner, T., Lei, X., Luo, Y., Zhou, M., Han, Z., Li, D., 2018, "Review on HVDC Cable Terminations", *High Voltage*, Vol.3, No.2, pp. 79-89.
- Yidong, H., Yu, T., 2013, "Reliability Improvement Strategies for HVDC Transmission System", *Energy and Power Engineering*, Vol.5, No.3B, pp. 52-56.
- Zangana, S., Ercelebi, E., 2016, "Enhance Power Quality by HVDC System, Comparison Technique between HVDC and HVAC Transmission Systems", *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol.10, No. 2, pp. 271-279.
- Zeng, H., Gao, K., Zhu, Z., Li, D., Yang, R., Yang, L., "Research on Difference between HVDC and HVAC Cable Shielding Materials", 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), IEEE, Perth, Australia, 23-26 September 2018.



DIGITAL TWIN CONCEPT FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES

Göksel GÖKKUŞ

*Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, Nevşehir, TÜRKİYE
gokselgokkus@nevsehir.edu.tr*

(Geliş/Received: 12.07.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.08.2021)

ABSTRACT: In this study, research has been conducted on how to adapt the digital twin concept on wind and solar energy systems, which are alternatives to existing energy sources and have the largest share compared to other alternative energy sources. Predictions have been made on possible benefits provided to these energy sources by the digital twin concept, which is one of the popular study topics today. For this purpose, firstly, the concept of the digital twin is introduced and information about its recent applications is given. Then, information is given about how the digital twin concept can be adapted to alternative energy sources, as suggested within the scope of the study. In addition, academic studies in the field of renewable/alternative energy resources are examined and evaluations are made on the findings.

Key Words: *Digital twin concept, Renewable energy sources, Industry trend*

Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Dijital İkiz Konsepti

ÖZ: Bu çalışmada; mevcut enerji kaynaklarına alternatif niteliğinde olan ve diğer alternatif enerji kaynaklarına oranla en büyük paya sahip rüzgar ve güneş enerji sistemleri üzerine dijital ikiz konseptinin nasıl adapte edilebileceği hakkında araştırmalar yapılmıştır. Günümüzde popüler çalışma konularından biri olan dijital ikiz konseptinin bu enerji kaynaklarına ne gibi faydalar sağlayabileceği üzerine öngörülerde bulunulmuştur. Bu amaçla öncelikli olarak dijital ikiz konsepti tanıtılmış ve günümüzdeki uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra çalışma kapsamında önerilen şekli ile dijital ikiz konseptinin alternatif enerji kaynaklarına nasıl adapte edilebileceği hakkında bilgiler verilmiştir. Ek olarak yenilenebilir/alternatif enerji kaynakları alanında yapılan akademik çalışmalar incelenmiş ve elde edilen bulgular üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Dijital ikiz konsepti, Yenilenebilir enerji kaynakları, Endüstri trendleri*

1. INTRODUCTION

Renewable energy sources and the power components that make up these energy sources produce errors with the effect of the environment, the user, and the loads they feed (Peng, Zhao, & Wang, 2021). These errors can be examined under two headings, mechanical and electrical, depending on the structure of the system. The lifespan of energy systems and the sustainability of energy production can be achieved by pre-detection of the mentioned faults. It may be possible to get rid of the situation without damaging the system or with the least damage by predicting the errors and determining a strategy accordingly. Today, digitalization in industrial areas and the methods used in production

processes allow their continued operation without interruption (Liu, Fang, Dong, & Xu, 2021). This digitalization not only reduces the production costs of products, but also increases the production quality (Kritzinger, Karner, Traar, Henjes, & Sihn, 2018). Rapid developments in technology fields such as artificial intelligence and 5G have paved the way for industrial Internet of Things (IIoT) applications to be included in production processes (Lu, Huang, Zhang, Maharjan, & Zhang, 2021). With such new trends in the field of production, it has become possible to digitally monitor, optimize and control the behavior of the systems, and to produce digital copies of the data obtained (Lattanzi, Raffaelli, Peruzzini, & Pellicciari, 2021). With the contribution of industry 4.0, which is seen as another development branch in the industry, many concepts have come to the fore, one of these concepts is the digital twin (DT) (Juarez, Botti, & Giret, 2021). The digital twin also enables sub-developments such as automatic error checking with the support of the advantages of industry 4.0 and the new trends in the digitalization of the industry such as the internet of things (Sun, Lei, Wang, Liu, & Zhang, 2021), (Arafet & Berlanga, 2021). Sub-developments such as error control are developments that are used extensively especially in power generation facilities. By adding various deep learning methods to these developments, the area of influence has been expanded. The contribution of highly digitized production technologies such as Additive Manufacturing (AM) increases the capability of the digital twin concept (Bartsch, Pettke, Hubert, Lakamper, & Lange, 2021). The digital twin concept is used extensively in the field of aviation, apart from being used in multi-unit production. As an example of its use in this field, it can also be used in the production processes of aircraft, in the realization of complex designs, and in solving the limitations caused by human, environmental, design, and production errors (Cai, Zhu, & Zhang, 2021). The digital twin concept is not only used in energy production but also helps to consume energy efficiently and consciously and to reduce environmental pollution. 18% of carbon dioxide formation worldwide is produced by vehicles operating in the field of transportation (Bhatti, Mohan, & Singh, 2021). One of the two most important components affecting the development of machine learning, which is one of the popular fields of study today, is big data and the other is the digital twin (An, Chua, & Mironov, 2021). Various academic studies have proven that especially the use of electric vehicles and the digital twin concept that will be included in the management of these vehicles can contribute positively to reducing carbon dioxide emissions. In addition to all these, the digital twin concept can be used to predict the future performance, behavior, maintenance and repair needs of complex distributed energy systems (Rassolkin et al., 2021).

2. MATERIAL AND METHOD

In this section, the definition of the digital twin concept is given through the academic studies observed in the literature review, and information about the adaptation of this concept to wind and solar energy systems is given. The term digital twin was first introduced by Grievens during a presentation he made in 2003 (Lim, Zheng, & Chen, 2020), (Sjarov et al., 2020). As a digital twin definition; it is a digital structure created to understand, model, and improve the performance of the physical system. In other words, it is a virtual representation of a physical system (Schroeder et al., 2021). According to Grievens, the ability of a system to have a digital twin depends on three components. The first of these; a physically existing system to be digitally twinned, secondly; a digital copy of the system that allows to observe the behavior of the system one-to-one or to observe the changes, and thirdly; the data that will connect the physically existing system and its digital copy.

The data used in the digital twin concept are not retrospective heaps of data but are created or obtained from parameters that change in real-time. It is the visualization of multi-point or multi-source, synchronous data received over the real system with the concept of the digital twin, in a way to show the status of the real system. These data include electrical, mechanical, and environmental data that may affect the operation of the system. In addition, these data vary depending on time, temperature, vibration, pressure, torsion, etc. parameters as well as video and photo, which are editable images. The sources from which the data is provided; a wide variety of sensor structures, transducers, camera

(thermal, IR, etc.), unmanned aerial vehicles (drone/UAV), etc. possible to sort. All these data can be visualized in 3D or 4D to create a digital copy of the system. The block diagram of the digital twin concept is given in Figure 1.

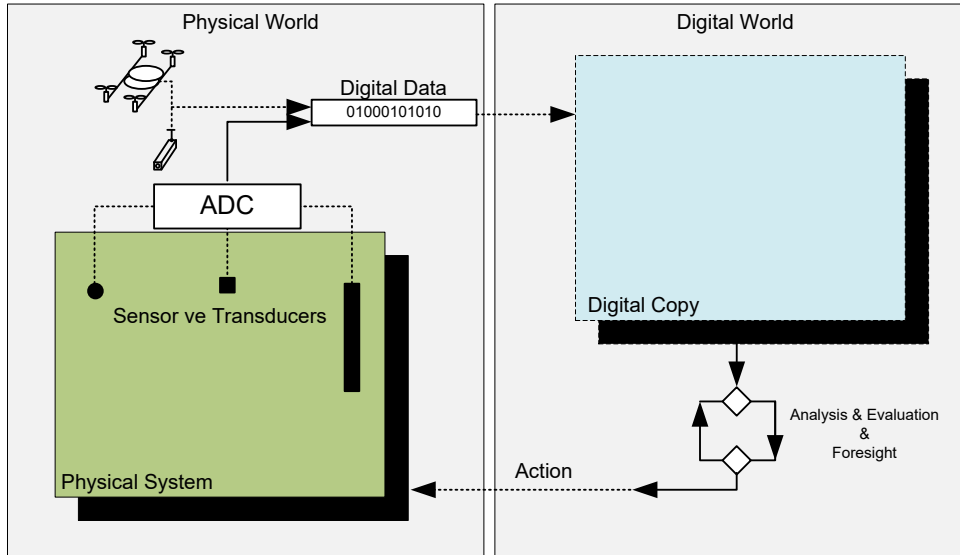


Figure 1. Block diagram of the digital twin concept

The dynamics of the systems play an important role in the implementation of the digital twin concept, but if it is desired to generalize, the digital twin concept can be created by fulfilling the following processes and stages. These processes and stages that can be applied to many systems or processes can be divided into sub-branches and detailed. The components of the created digital twin concept are adapted to the platforms that generate electricity from wind and solar energy.

Physical system: It is the physical component of the system. This component can be a building, energy platform, or mobile system.

Sensors and transducers: Various analog signals originating from the system or environment that affect the operation of the energy system in the physical structure; Electronic components of various structures to be used in sensing various mechanical parameters such as vibration, temperature, rotational speeds on shafts, pollution on panels, low-high pressure and electrical parameters such as current, voltage, power provided by the energy system.

Numerical data: It is the information obtained by converting analog signals detected by sensors and transducers into digital data. The continuity of the digital copy process can be ensured by obtaining this information securely and regularly.

Digital twin: The data received from the physical system is a digital copy of the system created in the province.

Analysis and evaluation: It is a set of processes created for the evaluation of the information obtained through the sensors and the analysis with various optimization and algorithms.

Foresight and action: The results obtained from the analysis and evaluation process turn into action in the process of foresight and action. Situations learned or predicted from the past that may prevent the operation of the system are decided in this section and precautions are taken.

If we list a few of the advantages that will arise with the adaptation of the digital twin concept to energy systems;

- Risk reduction can be made while transitioning from design to operation.
- Using the virtual model for digital modernization and maintenance can be beneficial.
- By using (Internet of Things, IOT) sensors, unmanned aerial vehicles, and other data sources, asset performance/asset management can be done and efficient system investments can be provided.

- Structural and mechanical integrity management can be provided to reduce maintenance costs and extend the life of the energy system.

- System analysis can be done in a shorter time with high-performance calculation.

- It can enable automatic and uninterrupted system design and management.

The components needed when we want to create a digital twin of the physical system are:

- 4D design (4D Design)

- Simulation

- It is possible to list it as optimized scheduling.

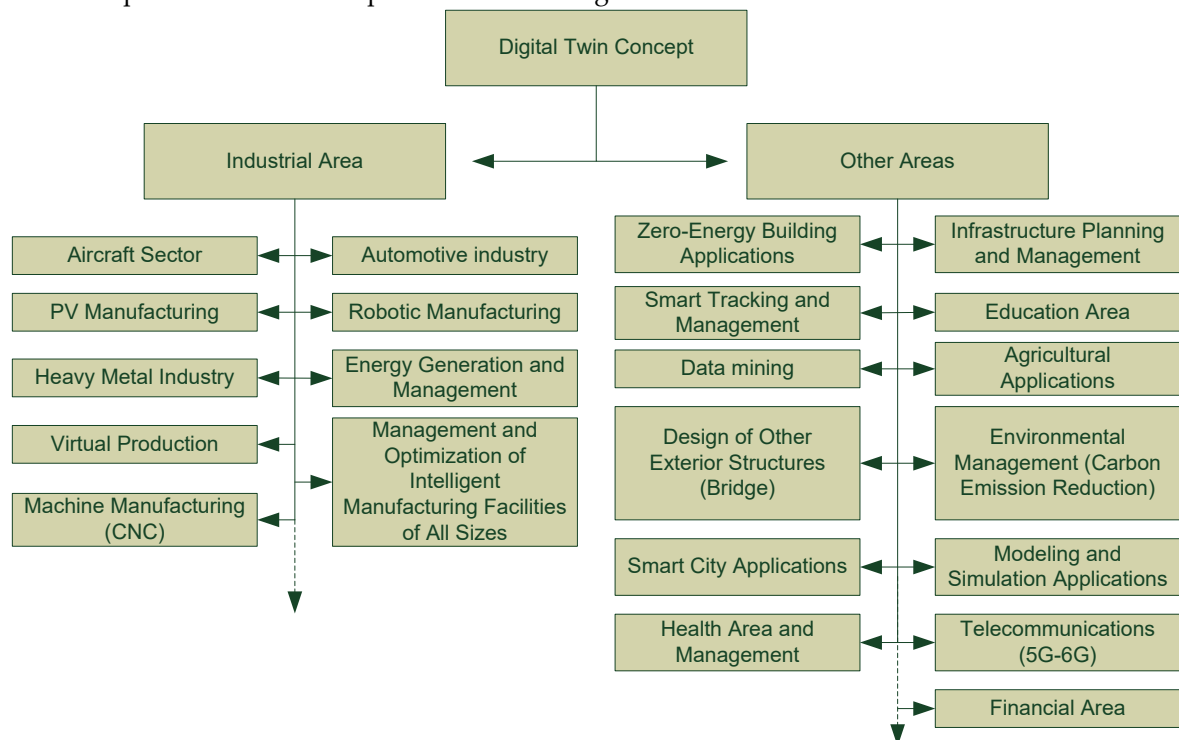


Figure 2. Diagram of the fields in which the digital twin concept is applied

A classification of the areas where the digital twin concept is applied, encountered in the literature review conducted within the scope of this study, has been made and given as a diagram in Figure 2. According to this diagram, it is seen that the most intense area where the digital twin concept is applied is the industrial area, as it is a developing trend with the support of industry 4.0 and IoT, but it is also used intensively in other areas. It is supported by academic studies, which include energy production and management, among the areas where the digital twin concept is applied. The use of these sources, known as distributed renewable energy resources (DRESs), which are alternatives to existing energy sources, which are mostly based on fossil fuels, contribute to the reduction of greenhouse gas and carbon dioxide production. However, the integration of these resources into the existing system and the inability to fully control and manage them may cause certain problems (Nguyen, Tran, Besanger, Jung, & Nguyen, 2021). Real-time monitoring of such energy sources with the DT concept helps to eliminate many problems that energy service institutions and organizations will encounter in the field (Darbali-Zamora et al., 2021).

2.1. Digital Twin Concept on Wind Energy Systems

Energy use and the need for energy are increasing all over the world. Wind energy promises to meet this need to a large extent and clean energy. The most widespread application area in the field of wind

energy is the ocean or offshore wind turbines (OWTs) platforms (Wang et al., 2021). Whether terrestrial or offshore, the digital twin concept is applicable and beneficial for wind turbines of all types.

Especially for off-shore platforms, whether fixed or floating, the digital twin concept plays an important role in protecting and monitoring these platforms against ship traffic, load density, corrosion, and glacial effects. In addition, the turbine tower, which is one of the components that make up the wind turbines in the fixed platform structure, greatly contributes to the seabed and installation situation. For wind turbines with floating platform structures, static fixation provides benefits in terms of load and motion connection. The rotor, bearings, gearbox, generator, and power converters that make up the wind turbines constitute 57% of the total faults. The recovery time of these faults also constitutes 65% of the total downtime of the turbine. Due to costly and slow-paced offshore operations, the costs of troubleshooting wind turbines in the form of floating platforms are expected to be higher (Moghadam, Reboucas, & Nejad, 2021). Figure 3 shows the external factors affecting the wind turbines in the floating platform structure.

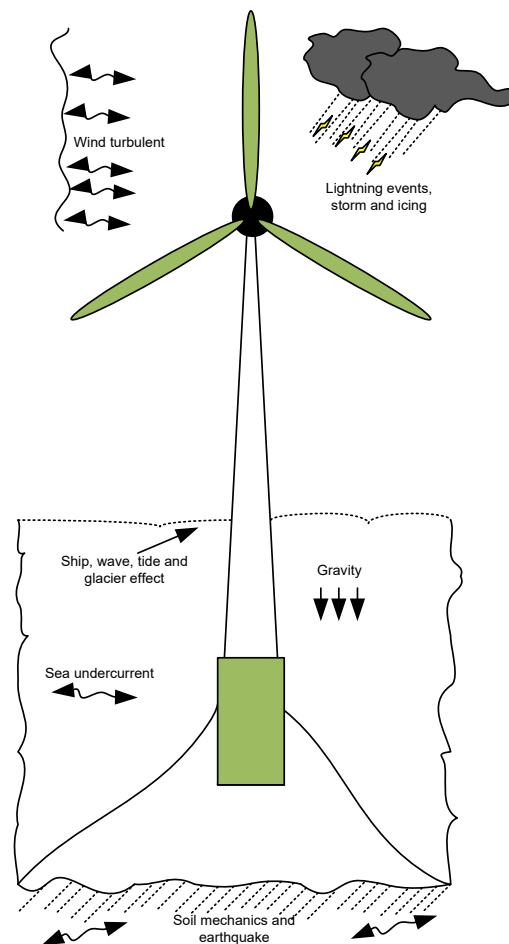


Figure 3. The external factors affecting the wind turbines in the floating platform structure

Wind turbines should have a long life due to their investment costs and structures and should be able to continue to provide energy for nearly 20 years with high reliability (Wang et al., 2021). With the digital twin concept applied to turbines, it becomes more possible to achieve these goals. As a result of the observations obtained from the literature, a model example of the application of the digital twin concept to a wind turbine is given in Figure 4. As a result of the various forces that the turbines are exposed to while generating electricity from the wind, the tower, blades, etc., which are the support structures of the turbines. Since components are prone to damage, the diagnosis of the malfunction that may occur in this case can be determined by the digital twin concept to estimate the remaining useful life of the turbine components. In the event of such failure, it is essential to strengthening structural reliability to

prevent unexpected failures and reduce operating costs by performing appropriate maintenance processes. By real-time monitoring of the operating state of the support structures of a wind turbine, regardless of its construction or application technique, it is possible with the digital twin concept to detect initial structural cracks and assess potential risks. As a result, turbine downtime and maintenance costs can be significantly reduced and the wind turbine service life extended.

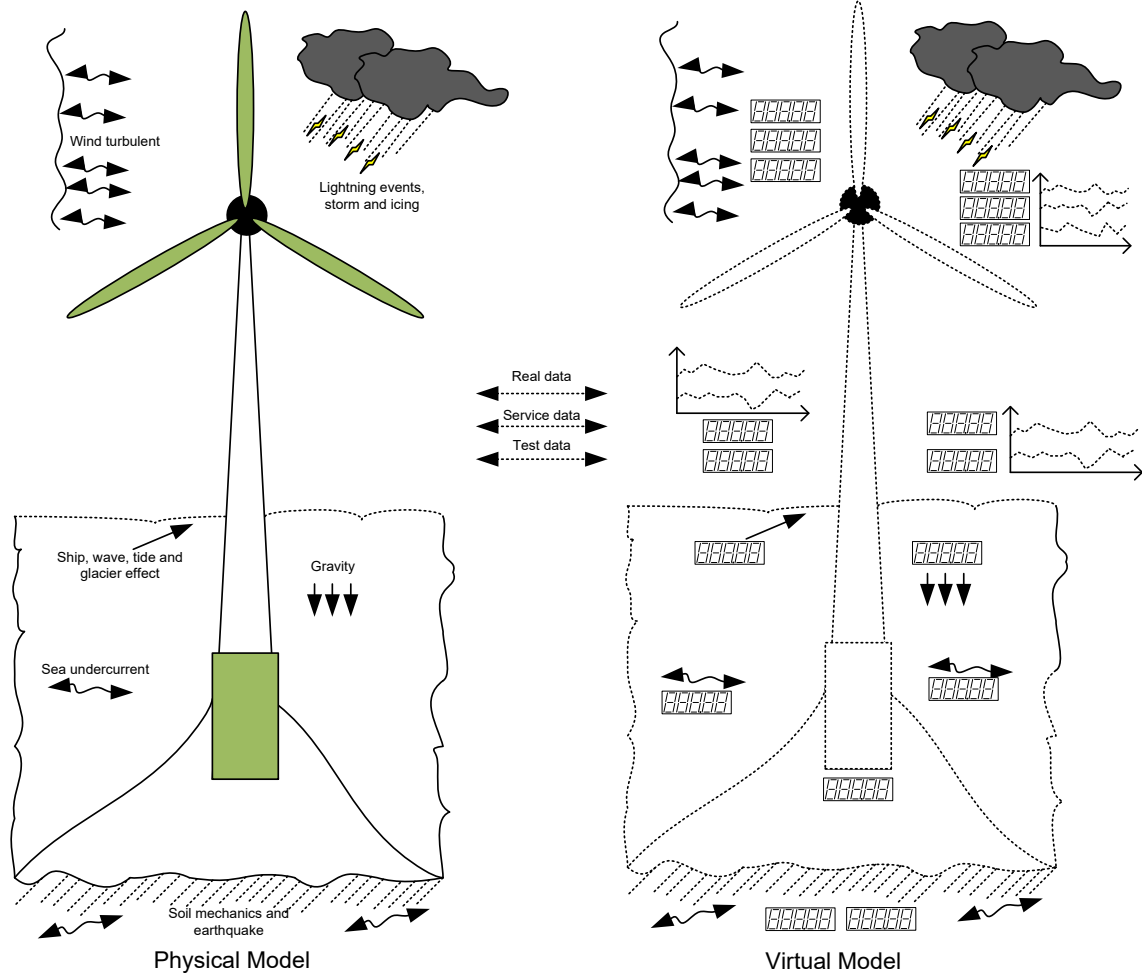


Figure 4. Example of digital twin model of offshore wind turbine application

In addition, the digital twin concept provides information about future investments and guides investors about the suitability of the system to be established for the region (Okse, 2016). With the optimization techniques to be added to the concept structure, it can be ensured that such systems with high investment costs can make a profit by meeting the investment costs in the shortest time and shorten the payback period.

2.2. Digital Twin Concept on Solar Energy Systems

Solar energy is more interesting than other alternative energy sources in meeting the electricity needs of residential or commercial buildings (Uzum, Onen, Hasanien, & Muyeen, 2021). Digital twin applications can also be made for energy systems that include photovoltaic (PV) panels, which is one of the techniques used in electricity generation from solar energy. In this context, the digital twin concept (Zohdi, 2021) is used to monitor and optimize the energy flow of complex and multi-purpose solar energy systems called Agrophotovoltaic (APV). In addition, real-time condition forecasting and detection using the digital twin concept can be used to optimize energy and grid services provided by distributed energy sources. Hot spots that occur in energy conversion systems where PV panels are

used, causing a PV cell or group of cells to heat up significantly and fail to generate power, are one of the major problems. Hot spots affect the performance of PV modules, causing losses. Moreover, the hot spots cause the cells to deteriorate and the PV system to lose its reliability (Dhimish, 2021). For PV energy systems with central inverter, string inverter, multi-array or micro-inverter architectures with lower cost, longer life and compact size, dq, alpha beta, abc, faulty transition and combined used in balanced and unbalanced grid integration (Kolantla, Mikkili, Pendem, & Desai, 2020) It may also be possible to develop different control strategies such as power flow control with the digital twin concept. It plays an important role in eliminating the measurement deficiency in the transmission and distribution area of electrical energy. Optimal reactive power control of distributed energy sources can also be used to reduce voltage violations caused by the inputs of PV systems into the existing system (Darbali-Zamora et al., 2021). Roof-mounted, building-integrated, or outdoor-applied solar energy systems play an important role in the application of smart technologies (Jain et al., 2020). In addition, with the application of the digital twin concept to PV systems, the data obtained from these systems can provide reference information for new systems to be established, as well as important information to investors who want to invest in this field (Cetinkaya, 2017). In Figure 5, a sample digital twin concept block diagram for the solar energy system using PV panels as a source is given.

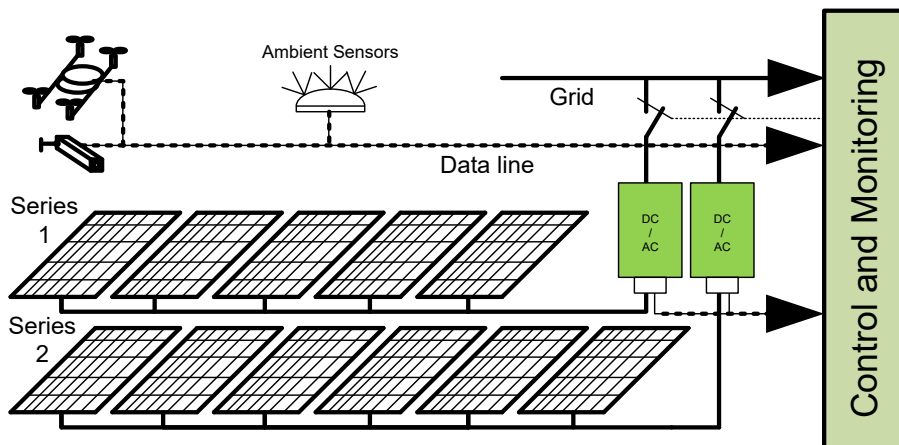


Figure 5. Example of digital twin concept for PV systems

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the study; a literature review was conducted on the adaptation of the digital twin concept, which is popular in many fields today, to wind and solar energy resources, supported by digitalization studies such as industry 4.0 and the Internet of Things (IoT).

As a result of the examination, it has been seen that the digital twin concept is used most intensively in the industrial field and as sub-fields;

- Monitoring and control of production processes,
- Design and simulation of aircraft,
- It is possible to list areas such as monitoring, error inspection, and control of systems that are inaccessible or such as offshore energy platforms. In real-time monitoring; By looking at the environmental and mechanical parameters besides the electrical parameters of the system, information about the state of the energy system is obtained from the data obtained, and it is possible to detect possible fault situations in advance.

Digital twin applications are included to examine the effects of various internal and external effects on the system, such as air, water pressure, and the forces created by this pressure, affecting energy systems. Observing the effects of dusting and pollution, which affects the performance of energy conversion systems widely preferred in electricity generation from solar energy in which solar panels are used, is possible with the digital twin. In addition, it is possible to detect the situation (hot spot) that

occurs in solar energy systems where a large number of panels in the array inverter structure are used and causes the panels to overheat locally, with thermal or IR cameras in the digital twin concept. As a result of this determination, it is ensured that the panels serve for longer periods without being damaged and that the energy system can produce energy uninterruptedly. According to the academic studies examined; Many data sources such as sensors, transducers, cameras, unmanned aerial vehicles can be used to create the digital twin concept. The fact that this data is real-time is also important in terms of the applicability of the digital twin concept. However, there is also the use of non-real-time data. These data can be data such as historical maintenance and service data. Since the physical system in the definition of the digital twin concept is a digital twin, it needs visualization technologies such as 3D/4D. In addition to all these, it is possible to develop the digital twin concept's ability to make predictions using data and make quick decisions with various algorithms and optimization techniques. In terms of all these usage areas and advantages, using the digital twin concept in smart and living cities and smart grid applications will be beneficial in every sense. In addition to all these aspects, thanks to the literature review made within the scope of the study and the proposals for the digital twin concept for energy systems, it can be a guide for future academic studies.

REFERENCES

- An, J., Chua, C. K., & Mironov, V. (2021). "Application of Machine Learning in 3D Bioprinting: Focus on Development of Big Data and Digital Twin", *International Journal of Bioprinting*, 7(1), 1-6. doi: ARTN 34210.18063/ijb.v7i1.342
- Arafet, K., & Berlanga, R. (2021). "Digital Twins in Solar Farms: An Approach through Time Series and Deep Learning", *Algorithms*, 14(5). doi: ARTN 15610.3390/a14050156
- Bartsch, K., Pettke, A., Hubert, A., Lakamper, J., & Lange, F. (2021). "On the digital twin application and the role of artificial intelligence in additive manufacturing: a systematic review", *Journal of Physics-Materials*, 4(3). doi: ARTN 03200510.1088/2515-7639/abf3cf
- Bhatti, G., Mohan, H., & Singh, R. R. (2021). "Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 141. doi:ARTN 11080110.1016/j.rser.2021.110801
- Cai, H. X., Zhu, J. M., & Zhang, W. (2021). "Quality Deviation Control for Aircraft Using Digital Twin", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(3). doi:Artn031008
- Çetinkaya, N. (2017). "Improving of renewable energy support policy and a performance analysis of a grid-connected 1 MWP PV power plant in Konya", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(3), 251-261.10.1115/1.4050376
- Darbali-Zamora, R., Johnson, J., Summers, A., Jones, C. B., Hansen, C., & Showalter, C. (2021). "State Estimation-Based Distributed Energy Resource Optimization for Distribution Voltage Regulation in Telemetry-Sparse Environments Using a Real-Time Digital Twin", *Energies*, 14(3). doi: ARTN 77410.3390/en14030774
- Dhimish, M. (2021). "Defining the best-fit machine learning classifier to early diagnose photovoltaic solar cells hot-spots", *Case Studies in Thermal Engineering*, 25. doi: ARTN 10098010.1016/j.csite.2021.100980
- Jain, P., Poon, J., Singh, J. P., Spanos, C., Sanders, S. R., & Panda, S. K. (2020). "A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems", *Ieee Transactions on Power Electronics*, 35(1), 940-956. doi: 10.1109/Tpel.2019.2911594
- Juarez, M. G., Botti, V. J., & Giret, A. S. (2021). "Digital Twins: Review and Challenges", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(3). doi: Artn 03080210.1115/1.4050244
- Kolantla, D., Mikkili, S., Pendem, S. R., & Desai, A. A. (2020). "Critical review on various inverter topologies for PV system architectures", *Iet Renewable Power Generation*, 14(17), 3418-3438. doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0317

- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", *Ifac Papersonline*, 51(11), 1016-1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
- Lattanzi, L., Raffaelli, R., Peruzzini, M., & Pellicciari, M. (2021). "Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. doi: 10.1080/0951192x.2021.1911003
- Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C. H. (2020). "A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1313-1337. doi: 10.1007/s10845-019-01512-w
- Liu, M. N., Fang, S. L., Dong, H. Y., & Xu, C. Z. (2021). "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications", *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017
- Lu, Y. L., Huang, X. H., Zhang, K., Maharjan, S., & Zhang, Y. (2021). "Communication-Efficient Federated Learning for Digital Twin Edge Networks in Industrial IoT", *Ieee Transactions on Industrial Informatics*, 17(8), 5709-5718. doi: 10.1109/Tii.2020.3010798
- Moghadam, F. K., Reboucas, G. F. D., & Nejad, A. R. (2021). "Digital twin modeling for predictive maintenance of gearboxes in floating offshore wind turbine drivetrains", *Forschung Im Ingenieurwesen-Engineering Research*, 85(2), 273-286. doi: 10.1007/s10010-021-00468-9
- Nguyen, V. H., Tran, Q. T., Besanger, Y., Jung, M., & Nguyen, T. L. (2021). "Digital twin integrated power-hardware-in-the-loop for the assessment of distributed renewable energy resources", *Electrical Engineering*. doi: 10.1007/s00202-021-01246-0
- ÖKSEL, C., Ali, K. O. Ç., Yıldız, K. O. Ç., & YAĞLI, H. (2016). "Off-shore Wind Energy Potential Research for Antakya Bay", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 18-29.
- Peng, Y. Z., Zhao, S., & Wang, H. (2021). "A Digital Twin Based Estimation Method for Health Indicators of DC-DC Converters", *Ieee Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2105-2118. doi: 10.1109/Tpel.2020.3009600
- Rassolkin, A., Orosz, T., Demidova, G. L., Kuts, V., Rjabtsikov, V., Vaimann, T., & Kallaste, A. (2021). "Implementation of Digital Twins for electrical energy conversion systems in selected case studies", *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 70(1), 19-39. doi: 10.3176/proc.2021.1.03
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Rodrigues, R. N., Henriques, R. V. B., Rettberg, A., & Pereira, C. E. (2021). "A Methodology for Digital Twin Modeling and Deployment for Industry 4.0", *Proceedings of the Ieee*, 109(4), 556-567. doi: 10.1109/Jproc.2020.3032444
- Sjarov, M., Lechler, T., Fuchs, J., Brossog, M., Selmaier, A., Faltus, F., Franke, J. (2020). "The Digital Twin Concept in Industry - A Review and Systematization", *2020 25th Ieee International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (Etfa)*, 1789-1796.
- Sun, W., Lei, S. Y., Wang, L., Liu, Z. Q., & Zhang, Y. (2021). "Adaptive Federated Learning and Digital Twin for Industrial Internet of Things", *Ieee Transactions on Industrial Informatics*, 17(8), 5605-5614. doi: 10.1109/Tii.2020.3034674
- Uzum, B., Onen, A., Hasanien, H. M., & Muyeen, S. M. (2021). "Rooftop Solar PV Penetration Impacts on Distribution Network and Further Growth Factors-A Comprehensive Review", *Electronics*, 10(1). doi: ARTN 5510.3390/electronics10010055
- Wang, M. M., Wang, C. Y., Hnydiuk-Stefan, A., Feng, S. Z., Atilla, I., & Li, Z. (2021). "Recent progress on reliability analysis of offshore wind turbine support structures considering digital twin solutions.", *Ocean Engineering*, 232. doi: ARTN 10916810.1016/j.oceaneng.2021.109168
- Zohdi, T. I. (2021). "A digital-twin and machine-learning framework for the design of multiobjective agrophotovoltaic solar farms.", *Computational Mechanics*. doi:10.1007/s00466-021-02035-z