

ISVOS JOURNAL

INTERNATIONAL



**SCIENTIFIC
AND
VOCATIONAL
STUDIES
JOURNAL**

TOPICS

**Engineering
Science
Maths
Health**

ISSN: 2618-5938

LIST OF EDITORS

EDITOR-IN-CHIEF

Umut Saray / Tokat Gaziosmanpaşa University

Tolga Yücehan / Afyon Kocatepe University

ASSOCIATE EDITORS

Abdil Karakan / Afyon Kocatepe University

Munise Didem Demirbaş / Erciyes University

MEMBER OF EDITORS

Ph.D. Cem Cüneyt Ersanlı	ORCID: 0000-0002-8113-5091	Sinop University
Ph.D. Uğur Çavdar	ORCID: 0000-0002-3434-6670	İzmir Demokrasi University
Ph.D. Tolga Yücehan	ORCID: 0000-0002-8835-0907	Afyon Kocatepe University
Ph.D. Umut Saray	ORCID: 0000-0003-3339-6876	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Munise Didem Demirbaş	ORCID: 0000-0001-8043-6813	Erciyes University
Ph.D. Özgür Alparslan	ORCID: 0000-0002-2264-2886	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Emre Avuçlu	ORCID: 0000-0002-1622-9059	Aksaray University
Ph.D. Elif Tezel Ersanlı	ORCID: 0000-0003-0608-9344	Sinop University
Ph.D. Pınar Çavdar	ORCID: 0000-0002-1989-4759	İzmir Demokrasi University
Ph.D. Özlem Toprak	ORCID: 0000-0002-6910-011X	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Özlem Afacan	ORCID: 0000-0001-6067-2456	Kırşehir Ahi Evran University
Ph.D. Fatih Polat	ORCID: 0000-0002-8758-8040	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Neslihan Özbek	ORCID: 0000-0001-7106-4763	Ahi Evran University
Ph.D. Ahmet Saygılı	ORCID: 0000-0001-8625-4842	Namık Kemal University
Ph.D. Bilal Şenol	ORCID: 0000-0002-3734-8807	İnönü University
Ph.D. Mevlida Operta	ORCID: 0000-0002-3028-2294	University of Sarajevo
Ph.D. Recep Ekici	ORCID:0000-0002-4420-8431	Erciyes University

Ph.D. Yeliz Durgun	ORCID: 0000-0003-3834-5533	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Canan Başlak	ORCID: 0000-0003-1444-1272	Selçuk University
Ph.D. Cem Emeksiz	ORCID: 0000-0002-4817-9607	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Sefa Ersan Kaya	ORCID: 0000-0003-1754-3901	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Altuğ Çağatay	ORCID: 0000-0001-7067-5570	Tokat Gaziosmanpaşa University
Ph.D. Abdullah Elen	ORCID: 0009-0009-1399-7704	Bandırma Onyedi Eylül University
Ph.D. Oktay Erdoğan	ORCID: 0000-0003-1466-3035	Pamukkale University
Ph.D. Ali Çiftçi	ORCID:0000-0001-8217-575X	University of Health Sciences
Ph.D. Arzu Ay	ORCID:0000-0002-8412-091X	Trakya University
Ph.D. Mohammad Ali Ghorbani	ORCID:0000-0002-0333-2559	University of Tabriz
Ph.D. Waggas Galib Atshan	ORCID: 0000-0002-7033-8993	University of Al-Qadisiyah
Ph.D. Rasoul Daneshfaraz	ORCID: 0000-0003-1012-8342	University of Maragheh
Ph.D. Ayhan Erciyes	ORCID: 0000-0002-0942-5182	Aksaray University
Ph.D. Feyza Gürbüz	ORCID: 0000-0002-6327-8232	Erciyes University
Ph.D. Serdar Özyön	ORCID: 0000-0002-4469-3908	Kütahya Dumlupınar University
Ph.D. Arzu Erçetin	ORCID: 0000-0002-8381-0011	İstanbul Kültür University
Ph.D. Güllü Kırat	ORCID:0000-0002-1167-0574	Yozgat Bozok University
Ph.D. Nil Doğruer Ünal	ORCID:0000-0002-4083-0944	Mersin University
Ph.D. Gökçe Şeker Karatoprak	ORCID: 0000-0001-5829-6914	Erciyes University
Ph.D. Mürşide Dartay	ORCID:0000-0001-8875-8702	Fırat University
Ph.D. Abdil Karakan	ORCID: 0000-0003-1651-7568	Afyon Kocatepe University
Ph.D. Çiğdem Gündoğan Türker	ORCID: 0000-0002-9003-0902	Festo Technology Center
Ph.D. Fateh Mebarek-Oudina	ORCID: 0000-0001-6145-8195	Skikda University
Ph.D. Ahmet Sarı	ORCID: 0000-0002-7452-083X	Karadeniz Technical University

INDEXES

The International Scientific and Vocational Studies (ISVOS) Journal is listed in the indexes given below.



Index Copernicus



Google Scholar



Worldcat

ResearchBib



Türkiye Atıf Dizini



JournalTOCs



ASOS INDEX



Global Scholar Index



Eurasian Scientific Journal Index



Crossref



The Open Ukrainian Citation Index (OUCI)



Paperity



ACARINDEX



German Union Catalogue of Serials (ZDB)



ISSN PORTAL



The Mathematics Information Service (fidmath)



Scilit



ROAD

CONTENTS

List of Editors	i
Indexes	iii
Contents	iv
Virtual Wallet Application With Two-Step Verification For Traveling Anywhere In The World	1
Optimizing PI Controller for Stability and Overshoot in Step Response Using GA and PSO Techniques, A Comparative Study	12
Multi-Objective Step Response Shaping via the Fractional-Order Proportional-Integral-Derivative Controller	24
An Interactive and Advanced Online Exam Platform For Both Teachers and Students	33
Spider Wasp Optimization Algorithm	42
Evaluation of Intelligent Transportation Systems using SWOT Analysis and Risk Analysis	68
Greenhouse Gas Emission Estimation and Risk Assessment for Sectors.....	81
Crayfish Optimization Algorithm	94
Performance Optimization of PID Controllers for DC Machine Drives Using PSO, ACO, and Hybrid PSO-ACO Algorithms.....	118
Structural Parameters, NLO, HOMO, LUMO, MEP, Chemical Reactivity Descriptors, Mulliken-NPA, Thermodynamic Functions, Hirshfeld Surface Analysis and Molecular Docking of 1,3-Bis(4-methylphenyl)triazine	130
A Multidimensional Investigation from Electronic Properties to Biological Activity of 2-[(4-Hydroxyphenyl)iminomethyl]thiophene by DFT, HOMO-LUMO, MEP, NLO, NBO, Mulliken, Hirshfeld and Molecular Docking Analyses.....	145
MPPT Method Supported by Particle Swarm Optimization for Increasing Power Efficiency in Solar Energy Systems.....	161
Monkeypox Diagnosis Using MRMR-Based Feature Selection and Hybrid Deep Learning Models: ResNet50V2, NASNetMobile, and InceptionV3.....	173

Virtual Wallet Application With Two-Step Verification For Traveling Anywhere In The World

Emre Avuçlu ^{a,1}, Yağmur Nur Küçükarslan ^b, Elif Örencik ^c

^a Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-1622-9059

^b Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye
ORCID ID: 0009-0008-9750-3021

^c Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye
ORCID ID: 0009-0000-3881-1771

Abstract

With the development of Intelligent Transportation Systems (ITS), the transportation sector is experiencing a major transformation. Other realized systems are just one example of innovative solutions, and it is expected that such technologies will become more widespread and an integral part of our lives in the future. This study aims to increase both the safety of users and the efficiency of transportation by taking these technologies one step further. The software we developed combines security technologies such as facial recognition and QR code to provide a safe and practical transportation solution that can be applied on a global scale. In the future, it is aimed for this system to be used in more countries around the world and to play an important role in the digitalization process of public transportation. The necessary experimental studies on face recognition were given in a table. Our application was developed using languages such as Html, Css, Bootstrap, JQuery, JavaScript, Ajax in the frontend and Python, Php, MySQL in the backend.

Keywords: “Virtual Wallet, face recognition, two-step verification.”

1. Introduction

With the impact of Industry 4.0, advances in technology have radically changed our lives. Especially in developed countries, these advances are also leading to revolutionary innovations in the transportation sector. Technology-based solutions are being developed in transportation services to minimize potential problems in traffic patterns and prevent errors. This is where ITS come into play. ITSs envisage the use of information-based systems in transportation that include multi-faceted analysis and control mechanisms for many purposes in order to increase traffic safety, facilitate payment transactions, shorten travel times, use road capacities more effectively and reduce environmentally harmful emissions [1]. Many different studies and projects are being carried out on this subject around the world and in our country. One of the sustainable transportation solutions is to shift travel to public transportation types [2]. In the general literature, the 1970s are accepted as the basic period for intelligent transportation systems, and in the relevant years, studies and trials were carried out in which intelligent transportation systems were operated, especially in South Korea, Japan, America and Europe [3]. Solutions that are actively designed in the architectural structure of smart transportation system data require innovative technology accumulation and trained human resources. The use of big data in public transportation companies has become widespread as of 2013. The data that creates the business-based smart transportation system ecosystem has reached trillion bytes to Petabytes with the development of smart transportation technologies [4]. ITS contributes significantly to the reduction of traffic problems in cities by improving the quality of public transportation services. With the continuous population growth in cities, the problem of inadequacy of resources to meet demand arises. Recent technological developments, especially the advancement of wireless communication and artificial intelligence technology, support the rapid development of intelligent transportation systems. Efforts to find solutions to transportation problems are supported by various studies. For example, Çapalı [5] examined the advanced technology ITS usage areas around the world and discussed the traffic software and highway applications in Turkey. This study revealed that traffic technologies in Turkey are insufficient and the use of ITS is necessary. Köz [6] examined the transportation policies in our country and discussed the issues of urban transportation and ITS. Today, rapidly developing information technologies have brought about the concept of ITS. Yıldırım [7] emphasized the importance of ITS technologies in disaster emergency management. This architecture can be built as a result of comprehensive studies involving all system stakeholders. In addition to these studies, the article by Bodur [8]

¹ Corresponding Author
E-mail Address: emreavuculu@aksaray.edu.tr

states that comfort-based transportation investments should be increased and that it is important to determine national strategies. Also noteworthy is the study by Kenanoğlu and Aydın [9], in which they discuss the measures that need to be taken to spread ITS to a wider area. In the light of these studies, it is understood that steps such as the dissemination of smart card systems and the development of mobile solutions supported by information systems are important. These studies generally cover the areas of ITS parking systems, traffic control, traffic planning and flow optimization, and driving safety. There are different studies for pricing systems outside these areas. However, these studies could not provide complete comfort and safety for passengers. Among the projects carried out for pricing systems, applications such as Smart Card and Payment Systems stand out. ITS applications are generally based on technologies such as Radio Frequency Identification (RFID), Near Field Communication (NFC), Quick Response (QR) Code, Contactless Credit Card and Validator. It is known that these technologies contribute to making transportation more efficient, reliable and environmentally friendly [10]. The ITS user services and service classification table developed by ISO for developing countries serves as a guide when creating the ITS architecture of countries [9]. In our country, ITS applications are considered a natural choice, especially when considering the intensive use of buses, minibuses, metro and rail systems in urban transportation [11]. Smart Card and Payment Systems are systems that allow passengers to use public transportation without paying cash during travel. User information and movements can be stored in these systems and institutions can use this information to make feedback or provide personal information. Smart Cards can be integrated with various services; for example, student cards can be used in different services such as transportation and food. These cards have chips that can store and process data, and payment transactions are carried out through card readers [12]. However, smart card systems may not always work safely and smoothly. Passengers may create security gaps by using other people's cards and may encounter problems during payment. In addition, the loss of time experienced during the money loading phase is among the disadvantages. The security problems that occur may pose serious dangers to the society. Current public transportation systems may also expose drivers to rights violations. Along with negative results such as loss of time and rights violations, this situation may cause various problems for the society. Due to this, it is aimed to eliminate these problems by carrying out different projects for the charging systems under the articles of ITS [13]. To prevent these problems, Moscow authorities announced that they have launched a new payment method based on facial recognition technology called "Face Pay" in the city's metro stations. Authorities state that Moscow is the first city to use facial recognition technology on this scale. The new payment system operates in more than 240 stations in the Moscow metro system, which is used by approximately 9 million people daily. It is thought that Face Pay will provide great convenience, especially when passing through turnstiles. It was stated that in order to use Face Pay, passengers must register their photos, bank cards and metro cards via the Mosmetro mobile application. The photo registered to the application must be taken in good light, showing the full face. At least 40% of the face must be visible for the technology to recognize users [14]. Different studies were conducted in different web-based areas [15, 16]. OpenCV library was used in the face mask recognition system [17].

In this study, a two-step verification system was developed. In this system, a web interface was developed where registered people can check their accounts. In this way, it was possible to travel freely all over the world thanks to the face recognition and QR code system. The main purpose of the study is to ensure the safety and trouble-free travel experience of users and drivers in transportation processes that take place in any time zone for any place to travel. Today, there is no system that finds/suggests a complete solution to this problem. To achieve this goal, we aim to provide a complete, easy, efficient, hassle-free and safe experience regardless of the means of transportation used. Our special software works in integration with cameras, enabling users to travel by making it easier to pay during the journey without having to deal with complicated procedures. This software is designed to ensure that users and drivers are safe at every stage. Our goal is to manage this process in the easiest and most effective way while ensuring safe travel conditions and paying the fare without any cash or cards.

2. Material and Methods

In this study, we addressed this system in a more comprehensive way, closing its security gaps and ultimately enabling it to operate anywhere in the world. In this study, with the two-step verification system, the personalized QR code and the person's face are scanned simultaneously and the verification process is performed. After the verification process, the money is deducted simultaneously and the passenger can check it from the mobile application. In this way, the privacy of the person is not violated by using their image. In addition, the person's passwords, unique number, image and other information are stored in our system with certain encryption methods and even different companies cannot access this information. While the Moscow system requires 40% of the face to be visible, our software can perform face scanning and control in various situations, and our system performs a perfect face scan. Thus, this process can be performed with any accessory on the person's face. In addition, in the next stage, we have made it possible to perform this system from anywhere in the world, from every city, from every public transportation vehicle. For this, some international agreements need to be made, an example of this is getting a visa. Thus, people will be able to travel flawlessly and completely safely, no matter where they go in the world. While doing this, they will not have to use any public transport vehicle they want and will not have to make any money conversion. Money can be deducted based on possible conditions (disabled, student, elderly) with the information entered during membership.

Taking into account the personal information and visual data entered when registering to the application, a facial scan will be performed with cameras in the vehicle during travel. With this transaction, travel money can be paid without cards or cash. In

this process, as proof that the person is actually present, if the QR code sent to the e-mail address during membership matches, the price will be deducted from the account. This measure will eliminate the possibility of unfairly deducting money from anyone's account and will also increase the security of the society. Users will be able to check their balance instantly from the application and add money to their accounts from anywhere, at any time. All information entered into the application will be protected by software engineers with certain encryption methods, making it almost impossible to access. If accessed in any way, the data will become meaningless thanks to the encryption and will not be observable. In this way, there will be no security gap and an easier and more convenient journey will be provided. In this way, when going somewhere, situations such as searching for a card, finding it, losing time, taking and giving money, etc. will be eliminated, as well as transactions such as taking and giving money, and exchanging money between the driver and the passenger while using public transportation vehicles. Some of the negativities we see in the news arising from these transactions will be prevented. The ultimate goal of the study is to enable anyone to travel in any city without having to use any card and to travel in any way they want as long as they have money in their balance with a transparent control system that can be verified by both parties (passenger and driver). In this study, Python language and OpenCV library will be used and a face recognition system that provides full security and gives successful results under all conditions has been developed. OpenCV's optimized C++ library can perform face detection and recognition operations as real-time fast detection. Face recognition technology is a technology that can identify or verify a person from a digital image or video frame. It usually works by comparing the facial features selected from the given image with faces in a database. Our system can detect any feature on the face without exception [18]. Our web application was developed using languages such as Html, Css Bootstrap, JQuery, JavaScript, Ajax in the frontend and Python, Php, MySQL in the backend. Users will be able to enter their personal information into the system during the membership creation process. The information entered will be recorded using encryption algorithms in accordance with the privacy policy, and any problems caused by system violations will be prevented. The information entered during membership includes name, surname, e-mail address, unique ID number, date of birth, phone number, city of residence, disability status, martyr/veteran affiliation status, profession, bank information and gender, and any uploaded files are also stored confidentially with the MD5 encryption method.

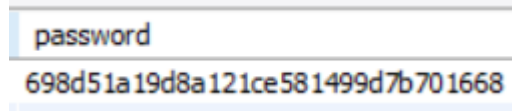


Fig. 1. Storing passwords in the database

Passwords will be stored as shown in Fig. 1, thus making it impossible to access the data.

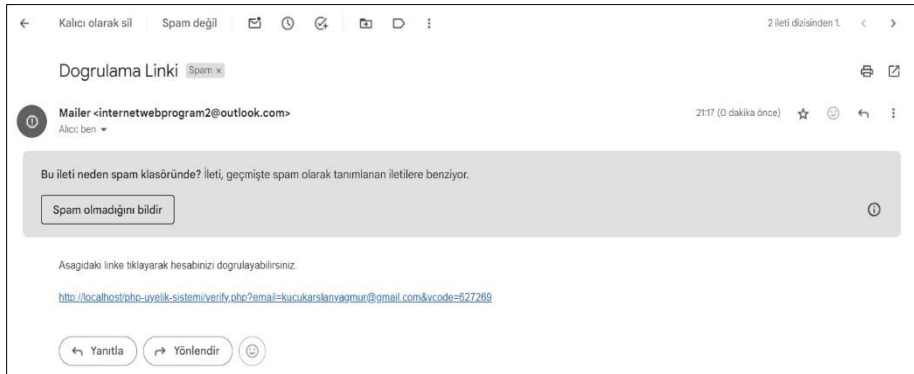


Fig. 2. Verification mail sent to the user's e-mail address

Afterwards, the photo capture page was opened for face recognition operations and photos showing the user's face from every angle were automatically taken, encrypted in the system and saved in the database.

In Fig. 2, when the register button is clicked, a personalized QR code and an extension address to activate the system are sent to the user's e-mail address.



Fig. 3. QR code sent to the user

Fig. 3 shows the QR code image specifically generated for the user.

	id	email	vcode
	5	kucukarslanyagmur@gmail.com	348683
	6	nefisekeskin@gmail.com	329448
	9	elif.yedekhesap@gmail.com	692818
	NULL	NULL	NULL

Fig. 4. Database where users who have not verified their emails are registered

Fig. 4 shows that accounts that have not been activated are recorded in another table. If activated by the user, the information is updated from the database.

	birth_date	telno	sehir	engel_durumu	engel_dosya_yolu	sehitlik_durumu	sehit_dosya_yolu	meslek	bankaadi	hesapno	iban	verified
18	2003-09-17	5445620190	ankara	Yok		Yok		Mühendis	ziraat	75482631	45642452	1
10	2001-02-15	455345344	Esloşehir	Yok		Yok		Doktor	ziraat	444455555	5544444444	1
11	2014-09-10	455345311	ankara	Yok		Yok		Mühendis	ziraat	71717171717	171717171717	1
4	4124-02-14	4272272	ankara	Yok		Yok		Mühendis	ziraat	5588888888	58585	1
22	2003-09-21	05464868199	ankara	Yok		Yok		Öğrenci	Ziraat Bankası	87965413164	13216546	0
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Fig. 5. Users who do not verify their emails in the database

In Fig. 5, accounts that have not been activated appear as 0 in the 'verified' block.

	birth_date	telno	sehir	engel_durumu	engel_dosya_yolu	sehitlik_durumu	sehit_dosya_yolu	meslek	bankaadi	hesapno	iban	verified
218	2003-09-17	5445620190	ankara	Yok		Yok		Mühendis	ziraat	75482631	45642452	1
910	2001-02-15	455345344	Esloşehir	Yok		Yok		Doktor	ziraat	444455555	5544444444	1
111	2014-09-10	455345311	ankara	Yok		Yok		Mühendis	ziraat	71717171717	171717171717	1
14	4124-02-14	4272272	ankara	Yok		Yok		Mühendis	ziraat	5588888888	58585	1
222	2003-09-21	05464868199	ankara	Yok		Yok		Öğrenci	Ziraat Bankası	87965413164	13216546	1
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Fig. 6. Users who verify mail in the database

Fig. 6 shows that if the user verifies the incoming mail, the value in the 'verified' column is updated to 1.

Add Personnel

Person Id

Name

Skill

Fig. 7. The page created to record face data

The system opened to record facial data after the registration process is shown in Fig. 7.

In Fig. 8, while the user scans his/her face, the system instantly saves 100 photographs of the person into the dataset. This data set to be created can be in any physical environment. Having the same person's face photo from all different environments is better for the system to recognize.

The 100 photographs recorded in Fig. 9 are saved in a folder and a data set is created.

Various tests were carried out under different recognition value conditions and the results obtained are shown in Table 1.

When the system is activated by clicking on the extension address, the user can log in to the system. There are some terms and conditions in the background of the software for security purposes. These terms and conditions are meticulously applied to ensure the security of user information.



Fig. 8. Recording the user's facial data

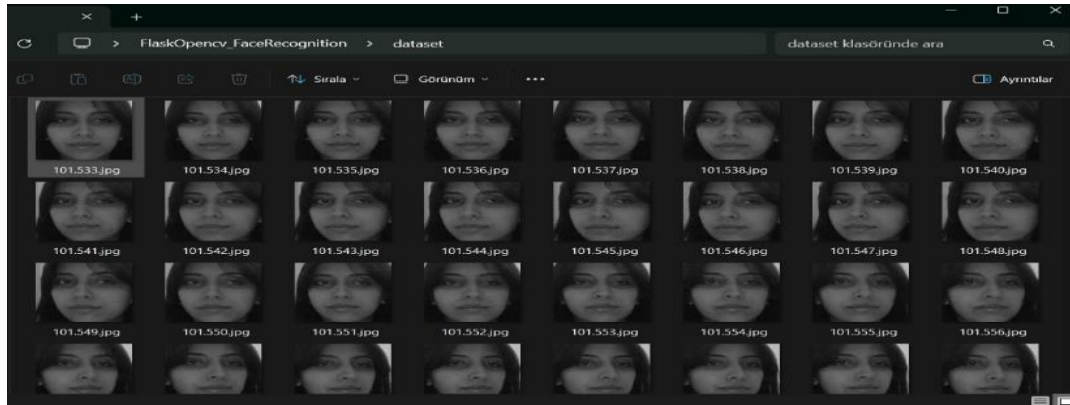


Fig. 9. Dataset consisting of users' face data

Table 1. Level of face detection in different situations

Ambient Light Condition	Angle of view of the face	Distance	Finding level
Too much	+/- 15-25 Degree	120 cm +/-15 cm	High
Too much	+/- 15-25 Degree	170 cm +/-15 cm	Medium
Medium	+/- 15-25 Degree	120 cm +/-15 cm	High
Medium	+/- 15-25 Degree	170 cm +/-15 cm	High
Medium	+/- 15-25 Degree	170 cm +	Few
Low	+/- 15-25 Degree	120 cm +/-15 cm	Medium
Low	+/- 15-25 Degree	170 cm +/-15 cm	Medium
Low	+/- 15-25 Degree	170 cm +	Few

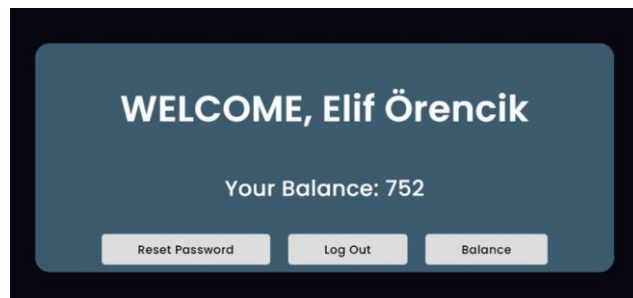


Fig. 10. Balance display page

In Fig. 10, after users successfully log in to the system, they are directed to the balance display page. This page includes password reset, balance update and exit transactions. Instant balance display system and balance loading transactions can be followed simultaneously through the application.

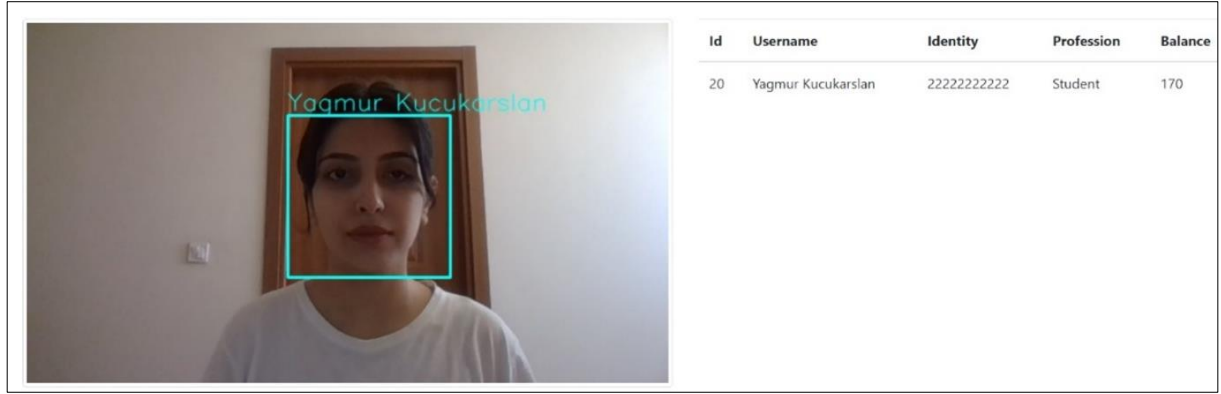


Fig. 11. The page where face recognition takes place

In Fig.11, when the camera is turned on, the face recognition process is performed simultaneously. In case of a suitable match between the person's face and the data set, the person's name, surname, unique identification number, occupation and balance information are displayed on the screen.

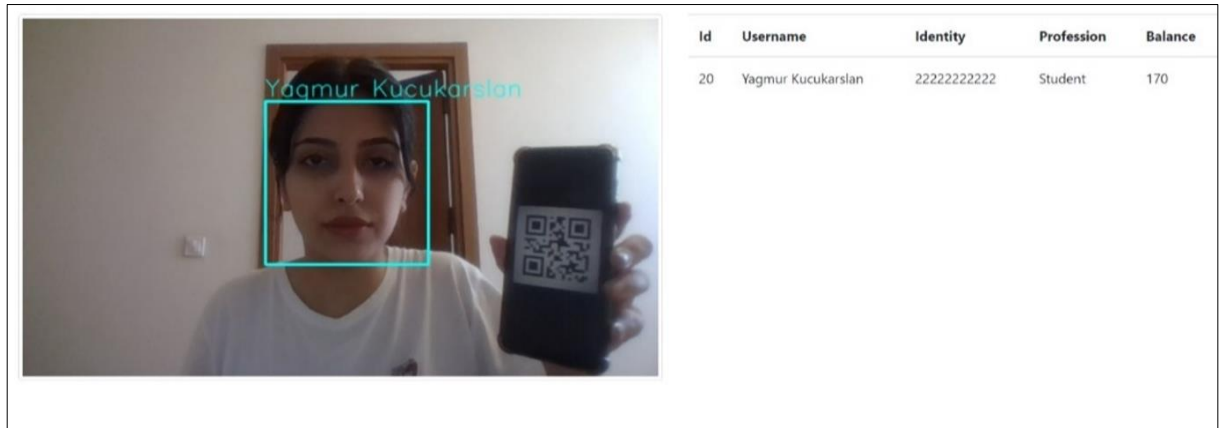


Fig. 12. Reading QR code to camera

During the journey, the person must show their personal QR code on the screen when they scan their face with the camera (Fig. 12.). This double verification system provides assurance that the person is really there at that moment.

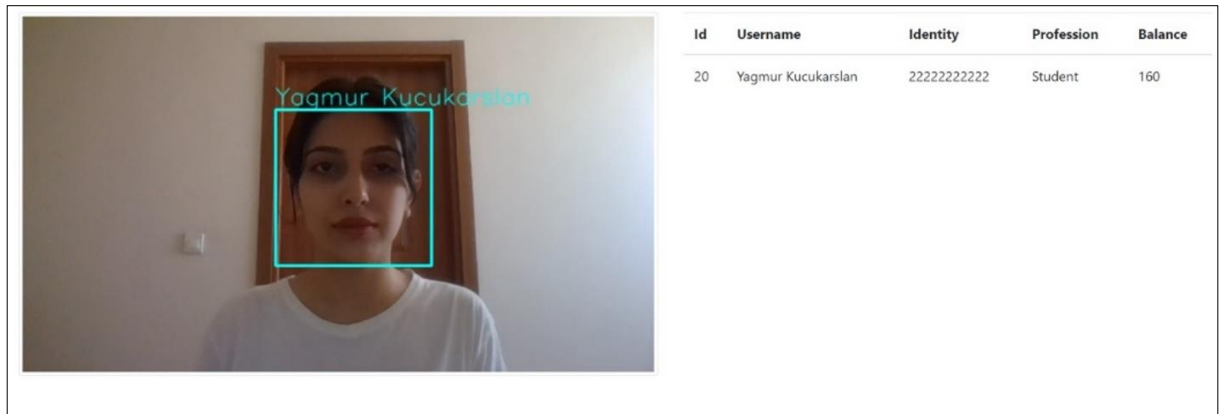


Fig. 13. Realization of the money deduction process

In Fig. 13, after both face recognition and QR code scanning processes, the system automatically deducts the fee. The user can view these processes instantly through the application. In this way, both a fully secure application is used and easier and more convenient transportation is provided. In addition, it will be possible to easily provide transportation abroad with this system.

In case of re-registration with a previously entered e-mail address, the system will give a warning and prevent the registration process. This application is made to prevent the risk of sharing or neglecting the QR codes used for the two-step verification system. Similarly, the system will give a warning in cases where the same unique ID number cannot be used for a person. When a user forgets their password and wants to change it, they can change their password if they are logged in and on the user page. In this case, changes can be made to the database in line with the necessary conditions and security measures. To add money to the account, 3D secure transaction steps are opened and money loading transactions are carried out. An interface system will be developed where users and travel agencies can see all the details regarding the balance section and usage. Thus, not only the user status will be followed, but also the drivers will be able to see the report of how many people and what type of passengers (students etc.) got on at the end of the day. Fig. 14 shows the general flow diagram of the application.

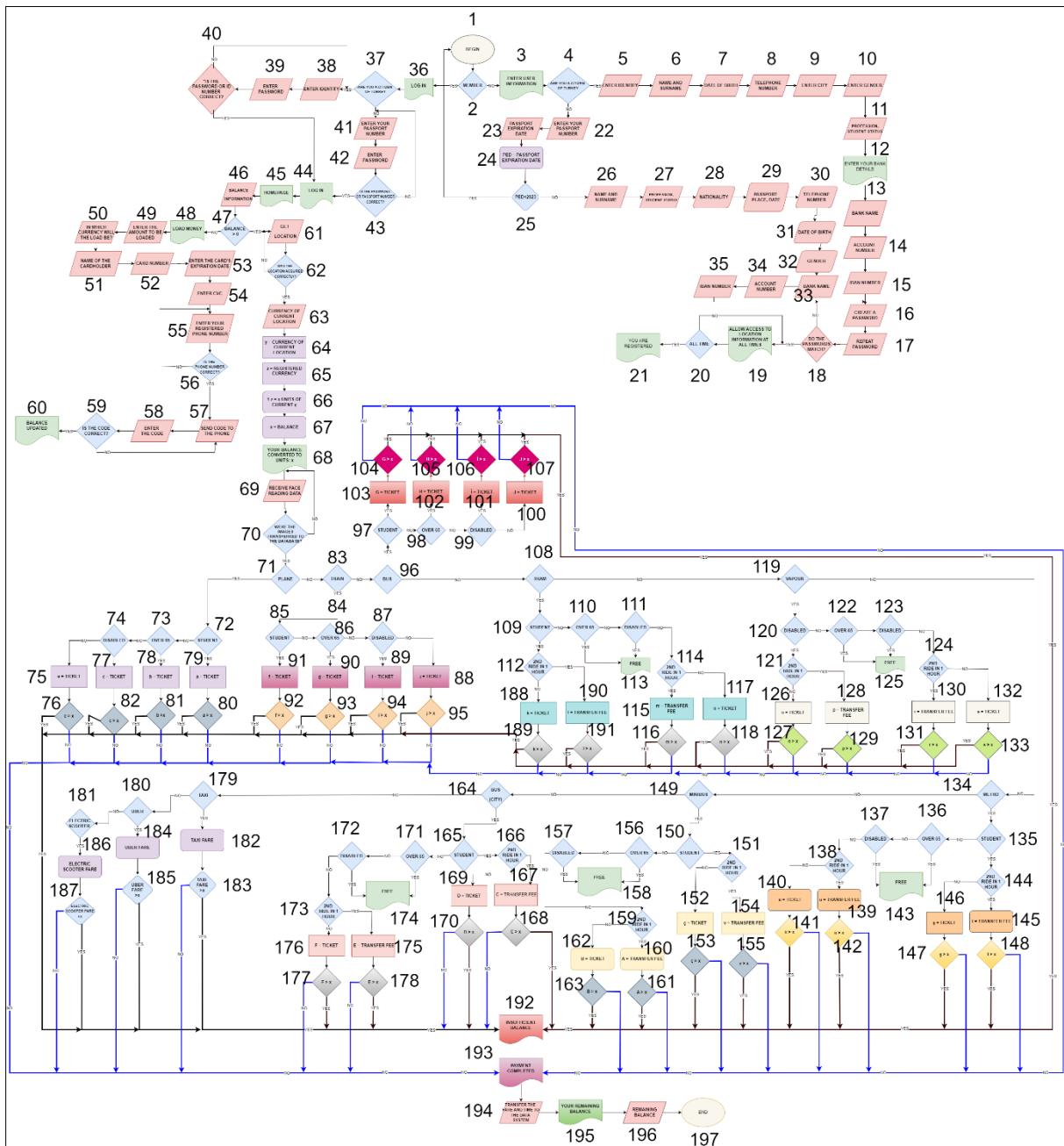


Fig. 14. General flow diagram of our application

Explanations of the numbers in the flow diagram are shown in Table 2.

Table 2. Explanations of numbers

[1]-BEGIN [2]-MEMBER [3]-ENTER USER INFORMATION [4]-ARE YOU A CITIZEN OF TURKEY [5]-ENTER IDENTITY [6]-NAME AND SURNAME [7]-DATE OF BIRTH [8]-TELEPHONE NUMBER [9]-ENTER CITY [10]-ENTER GENDER [11]-PROFESSION, STUDENT STATUS [12]-ENTER YOUR BANK DETAILS [13]-BANK NAME [14]-ACCOUNT NUMBER [15]-IBAN NUMBER [16]-CREATE A PASSWORD [17]-REPEAT PASSWORD [18]-DO THE PASSWORDS MATCH? [19]-ALLOW ACCESS TO LOCATION INFORMATION AT ALL TIMES [20]-ALL TIME [21]-YOU ARE REGISTERED [22]-ENTER YOUR PASSPORT NUMBER [23]-PASSPORT EXPIRATION DATE [24]-PED=PASSPORT EXPIRATION DATE [25]-PED<2024 [26]-NAME AND SURNAME [27]-PROFESSIONAL STUDENT STATUS [28]-NATIONALITY [29]-PASSPORT PLACE, DATE [30]-TELEPHONE NUMBER [31]-DATE OF BIRTH [32]-GENDER [33]-BANK NAME [34]-ACCOUNT NUMBER [35]-IBAN NUMBER [36]-LOG IN [37]-ARE YOU A CITIZEN OF TURKEY [38]-ENTER IDENTITY [39]-ENTER PASSWORD [40]-IS THE PASSWORD OR ID NUMBER CORRECT? [41]-ENTER YOUR PASSPORT NUMBER [42]-ENTER PASSWORD [43]-IS THE PASSWORD OR ID NUMBER CORRECT? [44]-LOG IN [45]-HOMEPAGE [46]-BALANCE INFORMATION [47]-BALANCE>0 [48]-LOAD MONEY [49]-ENTER THE AMOUNT TO BE LOADED [50]-IN WHICH CURRENCY WILL THE LOAD BE? [51]-NAME OF THE CARDHOLDER [52]-CARD NUMBER [53]-ENTER THE CARD'S EXPIRATION DATE [54]-ENTER CVC [55]-ENTER YOUR REGISTERED PHONE NUMBER [56]-IS THE PHONE NUMBER CORRECT? [57]-SEND CODE TO THE PHONE [58]-ENTER THE CODE [59]-IS THE CODE CORRECT? [60]-BALANCE UPDATE [61]-GET LOCATION [62]-WAS THE LOCATION ACQUIRED CORRECTLY? [63]-CURRENCY OF CUREENT LOCATION [64]-y=CURRENCY OF CURRENT LOCATION [65]-z=REGISTERED CURRENCY [66]-1 z = x UNITS OF CURRENT y [67]-x = BALANCE [68]-YOUR BALANCE CONVERTED TO UNITS: x [69]-RECEIVE FACE READING DATA [70]-WERE THE IMAGES TRANSFERRED TO THE DATABASE? [71]-PLANE [72]-STUDENT [73]-OVER 65 [74]-DISABLED	[99]-DISABLED [100]-J = TICKET [101]-İ = TICKET [102]-H = TICKET [103]-G = TICKET [104]-G > x [105]-H > x [106]-İ > x [107]-J > x [108]-TRAM [109]-STUDENT [110]-OVER 65 [111]-DISABLED [112]-2ND RIDE IN 1 HOUR [113]-FREE [114]-2ND RIDE IN 1 HOUR [115]-m = TRANSFER FEE [116]-m > x [117]-n = TICKET [118]-n > x [119]-VAPOUR [120]-DISABLED [121]-2ND RIDE IN 1 HOUR [122]-OVER 65 [123]-DISABLED [124]-2ND RIDE IN 1 HOUR [125]-FREE [126]-o = TICKET [127]-o > x [128]-p = TRANSFER FEE [129]-p > x [130]-r = TRANSFER FEE [131]-r > x [132]-s = TICKET [133]-s > x [134]-METRO [135]-STUDENT [136]-OVER 65 [137]-DISABLED [138]-2ND RIDE IN 1 HOUR [139]-u = TRANSFER FEE [140]-ü = TICKET [141]-ü > x [142]-u > x [143]-FREE [144]-2ND RIDE IN 1 HOUR [145]-t = TRANSFER FEE [146]-ş = TICKET [147]-ş > x [148]-t > x [149]-MINIBUS [150]-STUDENT [151]-2ND RIDE IN 1 HOUR [152]-ç = TICKET [153]-ç > x [154]-v = TRANSFER FEE [155]-v > x [156]-OVER 65 [157]-DISABLED [158]-FREE [159]-2ND RIDE IN 1 HOUR [160]-A = TRANSFER FEE [161]-A > x [162]-B = TICKET [163]-B > x [164]-BUS (CITY) [165]-STUDENT [166]-2ND RIDE IN 1 HOUR [167]-C = TRANSFER FREE [168]-C>x [169]-D = TICKET [170]-D > x [171]-OVER 65 [172]-DISABLED [173]-2ND RIDE IN 1 HOUR
---	---

[75]-c=TICKET [76]-e>x [77]-c=TICKET [78]-b=TICKET [79]-a=TICKET [80]-a>x [81]-b >x [82]-c > x [83]-TRAIN [84]-TRAIN [85]-STUDENT [86]-OVER 65 [87]-DISABLED [88]-j = TICKET [89]-i = TICKET [90]-g = TICKET [91]-f = TICKET [92]-f > x [93]-g > x [94]-i > x [95]-j > x [96]-BUS [97]-STUDENT [98]-OVER 65	[174]-FREE [175]-E = TRANSFER FEE [176]-F = TICKET [177]-F > x [178]-E > x [179]-TAXI [180]-UBER [181]-ELECTRIC SCOOTER [182]-TAXI FARE [183]-TAXI FARE > x [184]-UBER FARE [185]-UBER FARE > x [186]-ELECTRIC SCOOTER FARE [187]-ELECTRIC SCOOTER FARE>x [188]-k = TICKET [189]-k > x [190]-l = TRANSFER FEE [191]-l > x [192]-INSUFFICIENT BALANCE [193]-PAYMENT COMPLETED [194]-TRANSFER THE FARE AND TIME TO THE DATA SYSTEM [195]-YOUR REMAINING BALANCE [196]-REMAINING BALANCE [197]-END
--	---

The QR code creation block code in our application is as shown in Table 3.

Table 3. Qr code creation code block

Code-Block: read_qr_code() Function:
<pre> 1. def read_qr_code(frame): 2. decoded_objects ← decode(frame) 3. if decoded_objects: then 4. return decoded_objects[0].data.decode('utf-8') 5. else: return "" 6. qr_read ← False 7. def check_qr_data(qr_data , s): 8. global qr_read 9. mycursor.execute("SELECT ..", (s,)) 10. qrcontent ← mycursor.fetchone() 11. mycursor.execute("SELECT ..", (s,)) 12. face_name ← mycursor.fetchone() 13. mycursor.execute("SELECT ..", (s,)) 14. register_name ← mycursor.fetchone() 15. mycursor.execute("SELECT ..", (qr_data,)) 16. balance_result ← mycursor.fetchone() 17. if qrcontent: then 18. if face_name == register_name: then 19. mycursor.execute("SELECT ..", (qr_data,)) 20. obstacle ← mycursor.fetchone() 21. if obstacle and obstacle[0] == "None": then 22. mycursor.execute("SELECT ..", (qr_data,)) </pre>

There are some important functions in the algorithm we developed. To explain them briefly;

read_qr_code() Function:

This function detects and decodes QR codes in an image frame. The decode() function analyzes the QR code in the frame. If the QR code is detected, the content of the code is decoded and returned in utf-8 format. If the QR code is not found, an empty string is returned.

check_qr_data() Function:

This function checks the user's information in the database by comparing the QR code data (for example qr_data) and the name obtained as a result of face recognition (for example s). It is queried whether the QR code data and the name obtained as a result of face recognition match. The function also checks additional information such as the user's disability status, martyrdom status, occupation status and balance. If the user is a student and has a balance, 10 units are deducted from the balance, otherwise 20 units are deducted. If the balance is insufficient, the user is given an "Insufficient Balance" message. If the person is a martyr or disabled, no money is deducted.

face_recognition() Function:

This function performs face recognition. It contains a helper function called draw_boundary() that detects the face, draws a rectangle around it, and verifies the presumed identity of the face.

1. The image is converted to gray tones and face detection is performed with the classifier.detectMultiScale() function.
2. A rectangle is drawn around the face for each detected face. Then, the identity of the face is predicted with clf.predict().
3. The person's name is queried from the database with the predicted identity.
4. If the confidence score of the prediction is above 70%, the person's name is written on the image and the QR code shown on the screen is read with the read_qr_code() function.
5. The data obtained with the QR code and face recognition result is checked and verified in the check_qr_data() function. If correct, the user is given the "WELCOME" message; if not, the "QR code did not match" message is displayed.
6. If the confidence score is below 70%, the face is marked as "UNKNOWN".

This function aims to perform identity verification by integrating face recognition and QR code reading processes.

3. Conclusions And Future Works

As a result, in this study, a virtual wallet that can be controlled by users and travel agencies has been developed with a web-based face recognition system that is developed with the combination of web technologies and python programming-based systems and works simultaneously. Fee reduction transactions have been carried out according to the pricing tariff determined by the provinces. Thanks to the system where both the user and the travel agency can control the account control by entering their own system, all similar negativities such as getting a card, filling it, and losing time will be prevented. Perhaps in the future, by adding different verification methods, this study will be successfully implemented in real life.

References

- [1] M. Y. Çodur and S. Topdağı, "Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Kent İçi Toplu Taşımaya Etkisi: Erzurum İli Örneği," *Erzincan University Journal of Science and Technology*, vol 11, no. 3, pp. 576-586, 2018. DOI: 10.18185/erzifbed.409255.
- [2] A. Atizaz, J. Kim and S. Lee, "Travel Behavior Analysis using Smart Card Data," *Journal of Civil Engineering*, pp. 1532-1539, 2016.
- [3] M. Tektaş and N. Tektaş, "Akıllı Ulaşım Sistemleri Uygulamalarının Sektörlere Göre Dağılımı," *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, vol 2, no. 1, pp. 32-41, 2019. Access: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jitsa/issue/44655/547872>.
- [4] M. K. Şengül, Ç. Tarhan and V. Tecim, "Toplu Taşıma İşletmelerinde Akıllı Ulaşım Sistem Verilerinin Büyük Veri Teknolojileri İle Desteklenmiş İş Zekâsı Mimarisinde Uygulanması: Bir Literatür İncelemesi," *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol 12, no. 1, pp. 89-105, 2022. DOI: 10.47147/ksuıibf.1137192.
- [5] B. Çapalı, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Türkiye'deki Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009.
- [6] A. Köz, *Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Kent İçi Uygulamaları; İstanbul Örneğinin Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [7] İ. Yıldırım, *Afet Acil Durum Yönetimi ile İlgili Akıllı Ulaşım Sistemleri Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [8] M. A. Bodur, *Akıllı Ulaşım Sistemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2012.

- [9] M. E. Kenanoğlu and M. Aydın, "Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Dışsallık Bağlamında Değerlendirilmesi: Seçilmiş Ülke Uygulamaları," *ÇOMÜ Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, vol 3, no. 2, pp. 363-387, 2018.
- [10] "Yüzle Ödeme (Pay By Face) Nedir, Nerelerde Kullanılır, Nasıl İşler?," *Techsign*, 2022. Access: <https://www.techsign.com.tr/blog/yuzle-odeme-pay-by-face-nedir-nerelerde-kullanilir-nasil-isler>.
- [11] K. Fabregas, "NFC Payments," *Fit Small Business*, 2018. Erişim: <https://fitsmallbusiness.com/nfc-payments/>, Access Date: 08.04.2019.
- [12] A. Güngör, *Akıllı Şehir Otopark Sistemleri'nde NFC Kartların Ödeme Aracı Olarak Kullanılması Ve Güvenlik Alt Yapısı; İspark Ve İstanbul Kart Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [13] A. Özden, K. B. Akalın and Ç. Kara, "Toplu Taşımada Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Kullanımı: Türkiye'de Belediyelerin Sunduğu Hizmetlerin Değerlendirilmesi," *Journal of Transportation and Logistics*, vol 4, no. 2, pp. 51-64, 2019. DOI: 10.26650/JTL.2019.04.02.01.
- [14] "Moskova metro ayında yüz tanıma teknolojisi ile ödeme yapma dönemi başladı: Face Pay," *Donanım Haber*, 16 Ekim 2022. Access: <https://www.donanimhaber.com/moskova-da-yuz-tanima-teknolojili-odeme-sistemi-donemi-basladi--140390>.
- [15] E. Avuçlu and S. Yalçın, "A Web-Based Advanced Law Firm Tracking System Application For Lawyers," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol 8, no. 1, pp. 76-86, 2024. DOI: 10.47897/bilmes.1495894.
- [16] E. Avuçlu and S. Meral, "Advanced Web-Based Customer Taxi Appointment Request System," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol 8, no. 1, pp. 65-75, 2024. DOI: 10.47897/bilmes.1495877.
- [17] G. Kaur, R. Sinha, P. K. Tiwari, S. K. Yadav, P. Pandey, R. Raj, A. Vashisth and M. Rakhra, "Face mask recognition system using CNN model," *Neuroscience Informatics*, vol 2, no. 3, article no. 100035, 2022. DOI: 10.1016/j.neuri.2021.100035.
- [18] "Pycharm Flask Opencv Face Recognition Registration Menggunakan Database Mysql," *Triyonos*, Access Date: 19.09.2024. Erişim: <https://triyonos.com/pycharm-flask-opencv-face-recognition-registration-menggunakan-database-mysql>.

Optimizing PI Controller for Stability and Overshoot in Step Response Using GA and PSO Techniques, A Comparative Study

Bilal Şenol ^{a,1}, Uğur Demiroğlu ^b

^a Software Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-3734-8807

^b Software Engineering, Kahramanmaraş İstiklal University, Kahramanmaraş, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-0000-8411

Abstract

In this paper, we present a comprehensive and in-depth investigation on the optimization of Proportional-Integral (PI) controller tuning for achieving stability and desired overshoot in the step response. The main objective of this study is to compare the effectiveness of Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO) techniques in finding the optimal parameters for the PI controller. The PI controller is a widely used control algorithm that plays a crucial role in many industrial processes. Its tuning greatly affects the system's performance, particularly in terms of stability and overshoot. Therefore, finding the optimal tuning parameters is of utmost importance. To address this optimization problem, we propose the utilization of two popular metaheuristic algorithms, GA and PSO. These algorithms are known for their ability to efficiently search through large solution spaces and find near-optimal solutions. By applying these algorithms to the PI controller tuning problem, we aim to determine which technique yields better results in terms of stability and overshoot tuning. In our comparative study, we provide a detailed explanation of both GA and PSO algorithms, focusing on their working principles and mathematical formulations. We also describe how these algorithms can be applied to the PI controller tuning problem. Furthermore, we highlight the key differences between GA and PSO, shedding light on their strengths and weaknesses. To assess the performance of GA and PSO, we conduct several experiments using different benchmark functions and step response models. We measure the stability and overshoot metrics for various parameter settings obtained through GA and PSO. By thoroughly analyzing the obtained results, we draw meaningful conclusions regarding the effectiveness of each technique. Our findings demonstrate that both GA and PSO exhibit promising results in optimizing PI controller tuning. These observations provide valuable insights and guidelines for choosing the appropriate algorithm based on specific control requirements. In conclusion, this comparative study is thought to contribute to the field of control systems engineering by offering a comprehensive analysis of GA and PSO techniques in the context of PI controller tuning. By highlighting their strengths and weaknesses, it is aimed to provide researchers and practitioners with valuable information for making informed decisions when optimizing control parameters for stability and overshoot reduction purposes.

Keywords: "PI Controller, overshoot, step response, stability, genetic algorithm, particle swarm optimization."

1. Introduction

The study and examination of electronic systems, also known as system analysis, plays a vital role in various industries. One of the essential aspects of this process is understanding the step response. The step response is a crucial parameter that provides valuable insights into the behavior and performance of a system. In system analysis, the step response refers to the output of a system when a step input is applied to it. A step input is an abrupt change in the input signal, typically from zero to a constant value. By studying the step response, engineers and analysts can gain valuable information concerning the system's stability, transient response, and overall performance [1-3].

System stability plays a vital role in the efficient functioning of any given system. It is of utmost significance to ensure that a system remains stable and performs optimally over time. When a system lacks stability, it becomes susceptible to various issues, such as crashes, errors, and malfunctions. These issues can lead to significant disruptions in productivity, data loss, and even financial losses for businesses. One of the main reasons why system stability is crucial is its impact on user experience. A stable system provides a smooth and reliable platform for users to perform their tasks without interruption. Whether it's using software applications, accessing online services, or managing complex operations, a stable system ensures that users can complete their activities efficiently and effectively [4-6].

¹ Corresponding Author
E-mail Address: bilal.senol@aksaray.edu.tr

The step response exhibits several significant characteristics that make it an invaluable tool in system analysis. One of these characteristics is the overshoot [7]. Overshoot refers to the temporary excursion of the system output beyond the desired value before reaching stability. Understanding the magnitude and duration of overshoot is crucial in applications where precise control and stability are essential.

In control systems, the Proportional-Integral (PI) Controller holds great significance as it plays a crucial role in achieving precise control. This article aims to provide an exhaustive and comprehensive analysis of this controller, elucidating its functioning and impact on control systems. The Proportional-Integral (PI) Controller combines the proportional and integral control concepts to ensure improved control performance. By utilizing the proportional control aspect, the controller can respond to deviations in a system's output proportional to the error magnitude. This proportional action aids in minimizing steady-state errors and reducing overshoots. Apart from the proportional action, the PI controller incorporates the integral action to address accumulation of error over time, also known as integral windup. The integral control component continuously integrates the error signal, allowing the PI controller to effectively handle system disturbances and eliminate long-term steady-state errors [8-11].

The importance of metaheuristic methods in control theory lies in their ability to revolutionize the field of control systems. With their innovative approaches and powerful algorithms, these methods have proven to be invaluable in solving complex control problems that traditional methods fail to address. By harnessing the principles of optimization, search, and exploration, metaheuristic methods open up a whole new realm of possibilities for control theorists and practitioners. Whether it is enhancing the performance of autonomous systems, optimizing resource allocation, or designing robust controllers, metaheuristic methods provide a powerful toolkit for tackling real-world control challenges. From genetic algorithms to particle swarm optimization, these methods offer a diverse set of techniques that can be tailored to meet the specific needs of different control applications. With their ability to handle non-linear, multi-objective, and dynamic control problems, metaheuristic methods have become a cornerstone of modern control theory. As the complexity of control systems continues to grow, the importance of metaheuristic methods will only increase, helping us push the boundaries of what is possible in the world of control theory [12-15].

The Genetic Algorithm in controller tuning is a powerful and versatile method used to optimize the parameters of a controller [16]. By mimicking the process of natural selection and evolution, the Genetic Algorithm searches through a vast solution space to find the optimal set of controller parameters that maximizes the performance of the system. This algorithm works by iteratively generating a population of candidate solutions and evaluating their fitness based on a specified objective function. The fittest individuals are then selected to produce offspring, which inherit characteristics from their parents through crossover and mutation operations. This process continues for multiple generations until a satisfactory solution is found [17]. The Genetic Algorithm's ability to explore multiple possibilities simultaneously and find near-optimal solutions makes it an essential tool in controller tuning for complex and nonlinear systems [18, 19].

The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is a popular technique used for controller tuning in various fields [20]. PSO is inspired by the natural behavior of bird flocking or fish schooling, where individuals coordinate their movements based on the collective knowledge of the group. In controller tuning, PSO is utilized to find the optimal parameters for a given control system. By using an iterative process, the algorithm explores the search space and adjusts the controller parameters to minimize a specified performance metric, such as error or overshoot. This iterative process continues until the algorithm converges to a set of parameters that yield the best control performance [21, 22].

This paper implements the advantages of the above mentioned optimization algorithms to shape the step response of a time delay plant controlled by a PI controller. The aim in shaping is to satisfy the overshoot of the step response towards researchers' desire as well as to achieve stability. The literature surrounding step response shaping using PI controllers is rich with insights into the evolution, design, and optimization of PID control systems. The study in [23] discusses the optimization of Proportional-Integral (PI) and Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers to satisfy certain transient performance standards. This work presents tuning approaches that, akin to the Ziegler–Nichols technique, need just parameters derived from the plant's step response. The authors enhance the methodology to include plants with underdamped step responses and present a systematic way for adjusting the controller gain to meet specified transient performance criteria, including less overshoot and enhanced settling time. The foundational work in [24] highlights the integral role of the PID controller in industrial applications, emphasizing its ability to stabilize system outputs through manipulation of the error signal. Hill articulates the significance of the proportional, integral, and derivative gains, with particular emphasis on the integral term, which is crucial for driving the error signal to zero—a key aspect for achieving accurate step response shaping. Furthermore, Hill notes that while the derivative term can enhance transient response shaping, its tendency to amplify high-frequency noise poses challenges in practical applications. This early exploration sets the stage for understanding the complexities involved in tuning PID controllers effectively. In the valuable study in [25], an analytical approach for optimizing Proportional-Integral (PI) controllers in the Field Oriented Control (FOC) of Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) is presented. The authors analytically define the attributes of the closed-loop response to ascertain PI controller gains that satisfy specified dynamic criteria, including maximum overshoot and rising time. Due of the nonlinear characteristics of the resultant equations, the Newton-Raphson numerical approach is utilized for their resolution. The suggested method guarantees that, through the use of decoupled models of the PMSM, the closed-loop system operates linearly, ensuring stability throughout an extensive operational range. Building upon this foundation, [26] addresses the critical challenge of controller tuning in process control systems. He underscores the importance of optimizing PID controller parameters to enhance system performance, particularly in the face of inherent difficulties such as system nonlinearity and

unstable open-loop systems. Practical methods for near-optimal tuning of Proportional-Integral (PI) and Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers were studied in [27]. The authors present simple methods for adjusting PI and PID controllers to attain a balance between output performance and control activity, hence providing resilience in the mid-frequency range. For systems with all poles located on the negative real axis, a singular step response is enough for plant characterization. In systems exhibiting integral action, doing an impulse response or relay experiment is advisable. [28] introduces an improved gravitational search algorithm aimed at automating the tuning process, thereby providing optimized parameters for settling time, percentage overshoot, and steady-state error. This contribution not only complements [25] 's findings but also reflects the ongoing need for innovative solutions to improve the performance of widely used PID controllers, particularly given that a significant proportion remain poorly tuned in practice. Further advancing the discourse, [28] provides a contemporary perspective on the design of classical controllers, noting that over 95% of control loops in process control are of the PID type, with a predominant focus on PI control. He elaborates on the operational principles of the proportional, integral, and derivative actions, detailing how each component contributes to overall system stability and error correction. This article emphasizes the straightforward structure and ease of implementation of PI controllers, reinforcing their popularity in industrial settings. [28] also highlights the ongoing development of new tuning methods, which are critical for enhancing the design and effectiveness of these classical control systems.

The organization of this paper is as follows. Second chapter introduces the PI controller and briefly reminds the step response. The third chapter briefly recalls the GA and PSO methods. A case study is given in the fourth chapter and the fifth chapter includes the conclusions.

2. PI Controller and The Step Response

The literature on the structure and design of Proportional-Integral (PI) controllers reveals a rich history of development and refinement, particularly in the context of industrial applications. The work in [29] establishes a foundational understanding of fixed structure controllers, specifically focusing on the integration of a PI velocity feedback controller with a PI outer tension loop to effectively regulate web tension and velocity. Their investigation into systematic design methods highlights the importance of satisfying pre-specified performance criteria through parametric approaches. This paper underscores the versatility of these design techniques, suggesting their applicability extends beyond tension control to various control loops, thereby enriching the discourse on fixed structure controller design that has evolved since the 1960s. Building on this foundation, [24] shifts the focus to the broader category of PID controllers, which incorporate proportional, integral, and derivative elements. The author articulates the significance of the integral term within the PID framework, emphasizing its role in driving the error signal to zero and thus ensuring system stability. Hill's analysis traces the historical development of PID controllers, from their origins in mechanical devices to their modern digital implementations, illustrating the evolution of tuning methods that have accompanied this progression. The simplicity of the PID structure, which requires only three gain parameters, is highlighted as a key advantage, making it a popular choice in various industrial applications. This exploration into real-time optimal auto-tuning further complements the understanding of controller structures, emphasizing the need for efficient manipulation of error signals to stabilize system outputs.

The transfer function of the PI controller is given as follows.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (1)$$

As known, k_p is the proportional coefficient and k_i is the integral coefficient. The plant used in this study is a classical first order plus time delay plant which has the following structure.

$$P(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (2)$$

Here, K is the gain constant, T is the time constant and L is the time delay. After this brief introduction, an explanation about the step response should be beneficial. First-order plus time delay (FOPTD) systems are among the most important and widely used dynamic processes in various major industries, such as power systems, automotive and aerospace systems, biological systems, and chemical processes, as well as refinery industries, to model their dynamic processing. Different technological innovations and rapid advances in computational power lead to faster, smarter, and more innovative control systems that require less energy, time, and effort to improve the dynamic quality of processing systems. Due to this ever-evolving technology, control systems are now mandatory for the vast majority of process industries. A control system is an essential part of an industry used to manage, automate, and regulate workflow. If any dynamic processing system is not under control, it is not possible to obtain accurate, steady-state, and reduced-error controlled outputs. During a control design, the operating plant is first investigated to find its dynamic characteristics. After determining its dynamic characteristics, the details of the operating plant are considered for selecting a suitable controller. During the investigation of a plant, it is often represented by a first or second-order dynamic

response plus a time delay. The dynamic system defined by the first-order plus time delay (FOPTD) system is an essential part of modern control theory. Many controllers have been designed for this type of dynamic system, which is quickly and efficiently applied in many engineering control and automation applications. The step changes and transfer functions of FOPTD systems are used in numerous fields, such as medicine, chemical processes, refinery batch process productions, servo mechanisms, machine tools, biosystems, agriculture, aircraft, marine, and automotive industries. In many engineering control and automation applications, the input-output time response and transfer function equation of a first-order plus time delay (FOPTD) system are important and necessary. Even so, no single tool or method is used effectively to achieve the major control system objectives simultaneously for this practical class of dynamic control systems [30-33].

The literature review provides a detailed examination of step response analysis within the framework of control systems, particularly emphasizing the role of classical feedback control. A critical element of the analysis is the use of the frequency response function (FRF) to represent the system's behavior accurately. This approach allows for a more realistic assessment of system performance under operational conditions, moving beyond reliance on estimated transfer function models. The findings indicate that proper tuning of the PID controller can ensure that the system meets essential specifications related to gain and phase margins, peak sensitivity, and overall stability. The authors also highlight the classical PID controller's versatility across various industrial applications, demonstrating its effectiveness in improving both steady-state error and transient response through the integration of PI and PD components. In conclusion, the literature emphasizes the importance of step response analysis in control systems, particularly in relation to the performance of classical feedback controllers like the PID controller [34]. A sample illustration of the step response is given in Fig. 1 [35].

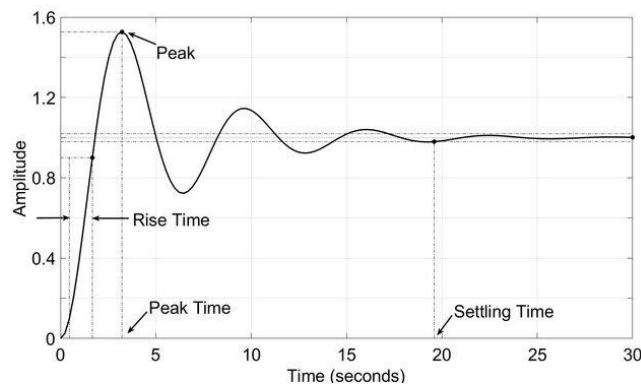


Fig. 1. The step response

This paper deals with the point named as “Peak” in the figure. The aim is to tune the overshoot (peak) value towards our desire using the well known optimization algorithms. Next section gives information about the genetic algorithm and particle swarm optimization.

3. Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization

3.1. The Genetic Algorithm

Originally proposed in the early 1960s, genetic algorithms (GAs) are a popular evolutionary algorithm designed to solve large, complex search and optimization problems that are difficult to model and solve propositionally using conventional methodology. Inspired by the Darwinian process of natural selection, GAs are based on the approach used by nature for the evolution of organisms on Earth. Genetic algorithms are based on these phenomena observed in the natural world, and these concepts were employed to solve technological problems. A search in GAs evolves a population of strings, under the process of natural selection and genetics, to optimize or solve a certain problem that requires optimization or search. One important aspect of using genetic algorithms is that no domain knowledge is assumed to solve the problem at hand, and only a set of primitive operations is applied to evolve a population of strings until a criterion is satisfied. The underlying principle of GAs is simple: the most fit will survive and propagate to the next generation, and it is believed that the long-term survival of a population in a complex environment will result in the evolution of a population. A diverse range of machine learning applications often makes use of genetic algorithms at some stage in their process. This adaptive process has been found to be successful, often when humans were unable to develop optimal methodologies due to lack of inherent knowledge or when most of the problem was uncertain and subjective. Key features of GAs are listed below.

- Evolution: The search technique is inspired by the natural selection process.
- Parallel search: The population evolves to represent the potential search space.

- Multi-objective technique: More than one solution is simultaneously examined, providing a diverse range of solutions.
- Complex search space: Suitable for the irregular search space, where the derivative operation design is not feasible.
- Domain knowledge: No need for domain knowledge, apart from basic operations that can be performed.
- Some of the reasons to use GAs as opposed to traditional deterministic or stochastic optimization algorithms are:
- In a wide population, various loners can be obtained and propagated for further examination.
- More than one global solution at a time is found using a diverse population.
- Efficient in a practical real-world space, where the function might not have a continuous derivative and is not dominated by the optimal local solution.
- Optimization or learning does not require any additional conditions that have to be fulfilled, such as knowledge that will precede the final function or local minima.
- Some of the basic terminology used within GA description:
- Gene: Forms the basic building block of a chromosome; they are the basic underlying data that represent the solution.
- Chromosome: A chromosome is considered a finite sequence of genes in a fixed order.
- Population: A population is a group of K candidate solutions considered for the solution. Each individual can be considered as a chromosome that represents a possible potential solution.
- Allele: It represents a value of a gene.

The pseudo code of the GA can be written in the following way.

1. Initialize the population with random solutions.
2. Evaluate the fitness of each individual in the population.
3. Repeat until the stopping condition is met:
 - a. Select individuals from the population based on their fitness (selection).
 - b. Apply crossover to selected individuals to produce offspring.
 - c. Apply mutation to offspring to introduce variability.
 - d. Evaluate the fitness of the new individuals.
 - e. Replace some or all of the population with the new individuals.
4. Return the best individual as the solution.

DETAILS OF STEPS:

- INITIALIZE_POPULATION(size, bounds):

Create `size` individuals with random values within `bounds`.

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (3)$$

- FITNESS_FUNCTION(individual):

Compute the fitness of `individual`.

$$f(x) \rightarrow \square \quad (4)$$

- SELECTION(population, fitness_values, method):

Select individuals using a method like tournament, roulette wheel, or rank-based selection.

$$P(X_i) = \frac{f(X_i)}{\sum_{j=1}^N f(X_j)} \quad (5)$$

- Crossover(parent1, parent2, method):

Combine `parent1` and `parent2` using methods like single-point, two-point, or uniform crossover.

$$x_i^{offspring} = \begin{cases} x_i^{(p1)} & \text{if } rand() < 0.5 \\ x_i^{(p2)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

- MUTATION(individual, mutation_rate):

Randomly alter genes of `individual` with a probability `mutation\_rate`.

$$x_i = \begin{cases} 1 - x_i & \text{if } rand() < P_{mut} \\ x_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

- REPLACEMENT(population, offspring, strategy):

Replace individuals in the population using strategies like elitism, generational replacement, or steady-state replacement.

Additionally, some terminologies need to be understood when using GAs for further explanations. These terminologies are chromosome, gene, alleles, genotype, phenotype, and other GA terms. These definitions serve as a fundamental base for developing a sound understanding of genetic algorithms [19, 36, 37].

3.2. The Particle Swarm Optimization

In recent years, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has gained significant attention from researchers due to its ability to solve complex optimization problems. PSO is inspired by the social behavior of birds, which can be collectively seen as a flock. The flock consists of birds moving together in a cohesive manner, and the birds collectively decide the direction of flight. The collective movements of a bird swarm may give the impression that collective intelligence is at work. Expanding on this phenomenon of birds flocking to a closed space, computer scientists have developed a collective intelligence-based search algorithm. They have been successful in the planning and execution of such algorithms for optimization problems. PSO attempts to optimize problems by simulating the social behavior of birds [38-40].

With the advancement of sciences like engineering, biology, and others in the last few decades, the problems formulated in these fields are complex in terms of the size of the search space. Traditional optimization methods face a number of challenges while solving such problems. Therefore, researchers are looking to overcome these challenges by utilizing some nature-inspired algorithms to aid in the solution of such problems. In the past, many meta-heuristic algorithms have been proposed by researchers. The motivation for preparing a comprehensive study of PSO is to provide insight into various computational intelligence techniques. The specific objectives of this comprehensive study are to highlight the differences existing among various relatively recent issues and to signal the possible future trends for research scholars. It is a powerful algorithm and may provide optimal solutions for complex problems where different soft computing techniques or some traditional methods may yield inferior solutions.

The basic terms used in PSO include particle, position, velocity, pBest, gBest, c1, c2, w, fitness function, domain space, and swarm. Many researchers in the field of PSO consider these terms to be the most important terms that are used in PSO. These terms are defined as follows:

- Particle: a single member of the swarm.
- Position: the location of a particle in the search space.
- Velocity: a particle's position and how it is modified during a search. Formally, it is the direction of future estimated improvements.
- pBest: personal best solution that a particle has encountered during the search process.
- gBest: global best solution in a swarm or used for a local fitness problem. A global best solution is a solution that is found from all particles in a swarm.
- c1 and c2: learning factors that control the contributions of pBest and gBest. The two learning factors c1 and c2, both in the range of [0, 2], control the cognitive and social components of PSO. The cognitive component promotes the exploitation process, and the value of a given pBest for each individual exploration is reflected by the value of c1 and also by (Xi (k) - pBesti (k)). The social component represents the exploration process, and the value of gBest of the group solutions exploration is reflected by the value of c2 and also by (Xi (k) - gBest (k)).
- w: inertia weight factor that adjusts the PSO performance. Many researchers found that the values of the inertia weight factor that are in the range of [0.4, 0.9] can obtain a higher search performance in the search process. The inertia weight factor reflects on the ability of particles in the search process through its linear or nonlinear decrease in velocity over time.
- Fitness Function: a fitness function assigned to each particle which indicates how well a possible solution fits the desired form.
- Domain Space: a space that includes all possible choices of a problem parameter.
- Swarm: a group of particles in the search space. Each particle in the swarm is characterized by its position, velocity, and its best position pBest that it has found during the generations of the search process.

All PSO parameters have a direct tuning effect on the search process performance. The important parameters of PSO based on the characteristics of the search space include the swarm size and the velocity, which is affected by three parameters: acceleration constant, pBest, and gBest. The behavior of each particle in the swarm is controlled by the cognitive (pBest) and social (gBest) acceleration coefficients, which are the degree of importance of the cognitive and social speed [41-43].

The pseudo code of the PSO can be written in the following way.

1. Initialize the swarm:
 - a. Set the number of particles, positions, velocities, and other parameters (e.g., inertia weight, cognitive and social coefficients).
 - b. Randomly initialize each particle's position and velocity within the search space.
 - c. Evaluate the fitness of each particle's position.
 - d. Set each particle's initial personal best position (pBest) to its current position.
 - e. Identify the global best position (gBest) among all particles.
2. Repeat until the stopping condition is met:
 - a. For each particle:
 - i. Update the particle's velocity:

$$v[i] = w * v[i] + c1 * r1 * (pBest[i] - x[i]) + c2 * r2 * (gBest - x[i])$$
 - ii. Update the particle's position:

$$x[i] = x[i] + v[i]$$
 - iii. Evaluate the fitness of the new position.
 - iv. Update the particle's personal best (pBest) if the new position is better.
 - b. Update the global best position (gBest) if any particle's new position is better than the current gBest.
3. Return the global best position (gBest) as the solution.

Key Formulations in the Pseudocode:

1. Velocity Update Rule

For particle i , the velocity update formula is:

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pBest - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gBest - x_i(t)) \quad (8)$$

where, w is the inertia weight (controls the influence of the previous velocity). c_1, c_2 are the cognitive and social coefficients (control the influence of $pBest$ and $gBest$). r_1, r_2 are random numbers uniformly distributed in $[0, 1]$.

2. Position Update Rule

The position of particle i is updated as:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (9)$$

3. Fitness Evaluation

The fitness of each particle is evaluated using a predefined fitness function, $f(x)$

4. Personal Best

Each particle maintains its best position found so far:

$$pBest_i = \arg \min / \max f(x_i) \rightarrow (\text{depending on the problem}) \quad (10)$$

5. Global Best

$$gBest_i = \arg \min / \max f(pBest_i) \quad \text{for all } i \quad (11)$$

4. Case Study

Example 1: This example implements the GA and PSO to tune the PI controller for the below FOPTD plant.

$$G^1(s) = \frac{0.99932}{1.0842s+1} e^{-0.1922} \quad (12)$$

The step response will be plotted for 25 seconds and the peak of the step response is set to be 1.2 in magnitude. The GA resulted with the following PI controller at the end of the optimization process.

$$C_{GA_1}^1(s) = 0.534251 + \frac{1.599687}{s} \quad (13)$$

Simiarly, the result of the PSO after 1000 iterations is,

$$C_{PSO_1}^1(s) = 3.6778 + \frac{3.9271}{s} \quad (14)$$

Fig. 2 shows the step response obtained by using $C_{GA}(s)$ and Fig. 3 shows the one controlled with $C_{PSO}(s)$.

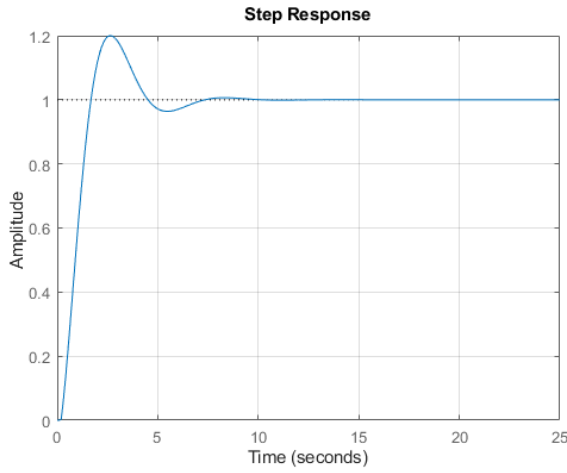


Fig. 2. The step response obtained with genetic algorithm for 20% overshoot

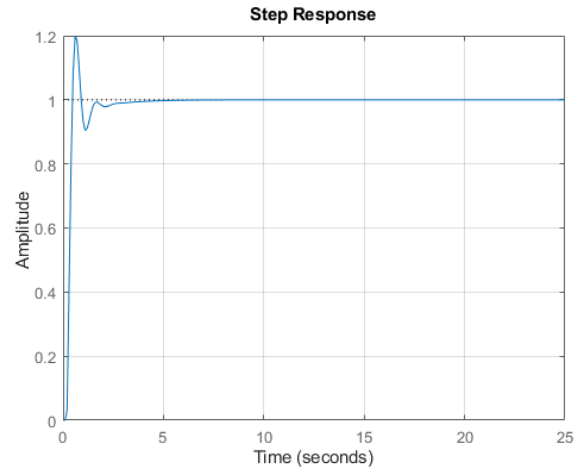


Fig. 3. The step response obtained with particle swarm optimization for 20% overshoot

We can see from the two step responses that both systems show stable response and their overshoot is exactly tuned to be 1.2 as desired. For comparison, it can be said that the genetic algorithm resulted with a longer rise time and settling time. Let us now tune the controller to obtain the step response with no overshoot. The PI controller obtained using the genetic algorithm is given as follows.

$$C_{GA_2}^1(s) = 2.006661 + \frac{1.850810}{s} \quad (15)$$

Simiarly, the PI controller obtained using the particle swarm optimization is,

$$C_{PSO_2}^1(s) = 1.847255 + \frac{1.703791}{s} \quad (16)$$

This time, the step response of the system obtained with the genetic algorithm is drawn in Fig. 4. Similarly, the step response obtained by tuning the controller with the PSO is given in Fig. 5. The two methods successfully achieved the system to have a step response with no overshoot. It can also be seen that the two step responses approximately match eachother.

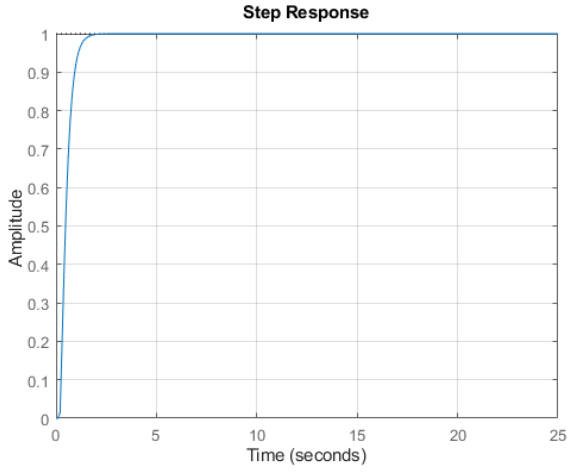


Fig. 4. The step response obtained with genetic algorithm for no overshoot

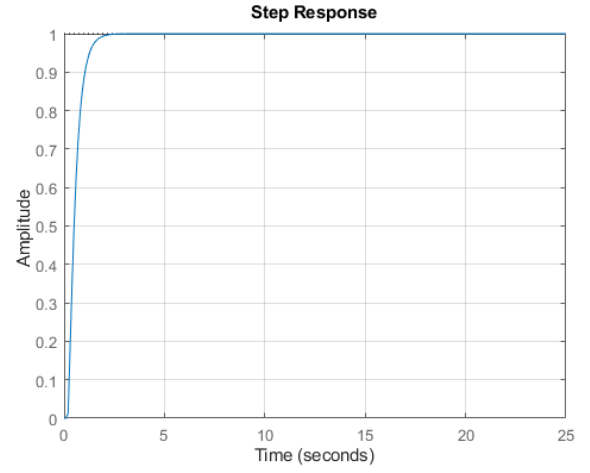


Fig. 5. The step response obtained with particle swarm optimization for no overshoot

It would be useful to apply the methods on another example.

Example 2: Consider the following time delay plant [44].

$$G^2(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.1} \quad (17)$$

The overshoot for this example is desired to be 10%. For this aim, following controllers have been obtained.

$$C_{GA}^2(s) = 0.522484 + \frac{1.334183}{s} \quad (18)$$

Similarly, the result of the PSO after 1000 iterations is,

$$C_{PSO}^2(s) = 6.935578 + \frac{3.837198}{s} \quad (19)$$

Using the controllers in Eq. 18 and Eq. 19, following step responses are found.

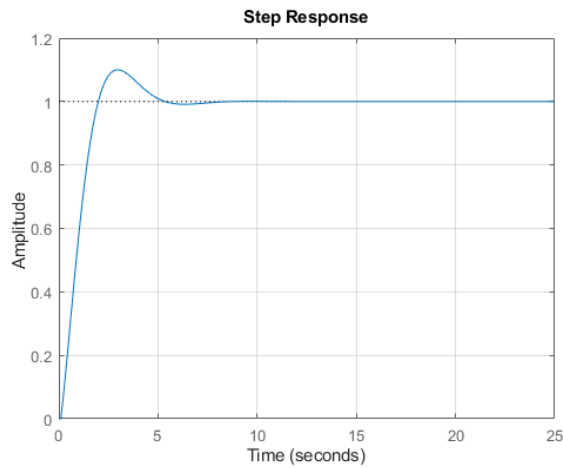


Fig. 6. The step response obtained with genetic algorithm for 10% overshoot

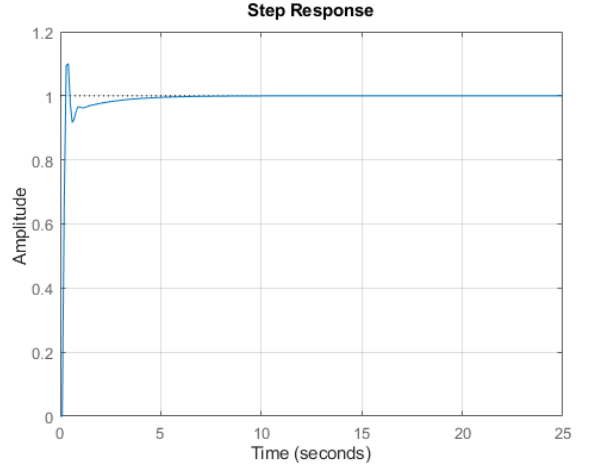


Fig. 7. The step response obtained with particle swarm optimization for 10% overshoot

It can be clearly seen in Fig. 6 and Fig. 7 that the overshoot of the step response is successfully limited to be 10%. Comparing two figures show that the step response obtained with the genetic algorithm has a smoother increase but relatively a larger steady

state time. In contrast, the step response obtained with the particle swarm optimization has a sharp increase and a smaller steady state time. Thus, the choice can be made by considering the needs of the system.

According to the report, the findings of the comparison study between the Genetic Algorithm (GA) and the Particle Swarm Optimization (PSO) for the tuning of the PI controller are quite illuminating. The overshoot levels that were intended (for example, 20%, no overshoot, 10%) were successfully obtained by both strategies, and the step response remained stable throughout the accomplishment. Nevertheless, discrepancies of a significant nature were identified in their performance. The use of GA often led to longer rising and settling durations, which indicated smoother transitions but slower reactions. PSO, on the other hand, displayed more abrupt climbs and shorter settling durations, which might be useful in systems that require speedier stabilization. These findings highlight how important it is to pick the optimization strategy based on the individual requirements of the system, striking a balance between smoothness and speed. It is possible that future study may concentrate on adapting these algorithms to a wide variety of step response qualities in order to facilitate the expansion of their practical applications.

5. Conclusions

This paper provides a thorough examination of the methodologies for optimizing Proportional-Integral (PI) controller tuning to achieve stability and desired overshoot in the step response. The primary objective of the study is to compare and contrast the effectiveness of two heuristic optimization techniques, namely Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), in finding the best parameters for the PI controller, which plays a critical role in industrial processes. The tuning process significantly impacts the stability and overshoot of the system, emphasizing the need for identifying the most suitable parameters. To tackle this challenge, the paper proposes the utilization of GA and PSO, both of which are renowned for their capability to efficiently explore large solution spaces. The study provides an in-depth explanation of the underlying principles of both algorithms and elucidates how they can be applied to solve the PI controller tuning problem. Moreover, it sheds light on the distinctions between GA and PSO, meticulously examining their respective strengths and weaknesses. In order to evaluate the performance of these optimization techniques in terms of stability and overshoot metrics, a series of experiments are conducted, employing various models and functions. The results obtained from these experiments demonstrate promising outcomes for both GA and PSO in the optimization of PI controller tuning, thereby offering valuable insights to researchers and practitioners alike, enabling them to make informed decisions based on the specific control requirements they may encounter. Ultimately, this comparative study provides a comprehensive analysis and delivers a wealth of valuable information to individuals involved in the field of control systems engineering.

The study lays the groundwork for a discussion of the findings by contrasting the effectiveness of Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO) in the process of tuning PI controllers for step response shaping. Nevertheless, a comparison with the current literature that is more specific might increase the depth of the conversation as well as the contextual relevance of the topic. According to the examination of the relevant literature, works such as [23] place an emphasis on transient performance requirements in PI and PID tuning. These studies also propose analytical approaches to achieve optimal overshoot and settling time respectively. In a similar vein, [28] outlines developments in traditional PID designs, which are the most common kind used in industrial settings. In comparison to the current investigation, the metaheuristic algorithms (GA and PSO) provide an automated and adaptable method that can accommodate different system dynamics without the requirement of pre-specified analytical parameters. The article effectively illustrates that both GA and PSO are capable of successfully achieving desired overshoot levels (for example, 20%, no overshoot, 10%). This is demonstrated in the conclusions section of the paper. Nevertheless, there are obvious trade-offs: GA exhibits smoother responses with longer rising and settling periods, whereas PSO gives faster answers but with sharper rises. Both methodologies have their advantages and disadvantages. The findings are consistent with the observations made in the literature, which state that GA frequently outperforms in exploration, whereas PSO strikes a balance between exploration and exploitation in order to achieve faster convergence [16, 20]. The publication might compare these results with analytical methods [23, 25] or other metaheuristics [26], describing circumstances in which GA or PSO might perform better than traditional approaches. This would enrich the presentation of the results. In order to emphasize the practical benefits of these algorithms, it would be beneficial to highlight their adaptability and flexibility in dealing with nonlinearities and requirements that involve several objectives. An further contextualization of the paper's contributions would be achieved by the use of benchmarks or measures from previous research, which would also make the conclusions more robust and generalizable.

References

- [1] G. Cui, J. Yu and Q. G. Wang, "Finite-time adaptive fuzzy control for MIMO nonlinear systems with input saturation via improved command-filtered backstepping," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 52, no. 2, pp. 980-989, 2020.
- [2] Y. Ji, X. Jiang and L. Wan, "Hierarchical least squares parameter estimation algorithm for two-input Hammerstein finite impulse response systems," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 357, no. 8, pp. 5019-5032, 2020.
- [3] Y. Ji and Z. Kang, "Three-stage forgetting factor stochastic gradient parameter estimation methods for a class of nonlinear systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 31, no. 3, pp. 971-987, 2021.

- [34] L. Abdullah, Z. Jamaludin, T. H. Chiew, N. A. Rafan and M. Y. Yuhazri, "Extensive Tracking Performance Analysis of Classical feedback control for XY Stage ballscrew drive system," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 229, pp. 750-755, 2012.
- [35] U. Agrawal, P. Etingov and R. Huang, "Advanced Performance Metrics and Sensitivity Analysis for Model Validation and Calibration," *Authorea Preprint*, 2023.
- [36] M. Gen and L. Lin, "Genetic algorithms and their applications," In *Springer handbook of engineering statistics* (pp. 635-674). London: Springer London, 2023.
- [37] Z. Z. Wang and A. Sobey, "A comparative review between Genetic Algorithm use in composite optimisation and the state-of-the-art in evolutionary computation," *Composite Structures*, vol.233, 2020.
- [38] H. R. R. Zaman and F. S. Gharehchopogh, F. S. (2022). An improved particle swarm optimization with backtracking search optimization algorithm for solving continuous optimization problems," *Engineering with Computers*, vol. 38, no. 4, pp. 2797-2831 2022.
- [39] Z. Yu, Z. Si, X. Li, D. Wang and H. Song, "A novel hybrid particle swarm optimization algorithm for path planning of UAVs," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 22, pp. 22547-22558, 2022
- [40] A. G. Gad, "Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review," *Archives of computational methods in engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 2531-2561, 2022.
- [41] H. Zhao, H. Yao, Y. Jiao, T. Lou, andY. Wang, "An Improved Beetle Antennae Search Algorithm Based on Inertia Weight and Attenuation Factor," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 1, 2022.
- [42] J. Chroua, F. Farhani, F. and A. Zaafouri, "A modified multi swarm particle swarm optimization algorithm using an adaptive factor selection strategy," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 0, no. 0, 2021.
- [43] B. Durmuş, "Opposite Based Crow Search Algorithm for Solving Optimization Problem," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 164-170, 2021.
- [44] B. Şenol and U. Demiroğlu, "Analytical Design of PI Controllers for First Order plus Time Delay Systems," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 40–47, 2018.

Multi-Objective Step Response Shaping via the Fractional-Order Proportional-Integral-Derivative Controller

Uğur Demiroğlu^a, Bilal Şenol^{b,1}

^a Software Engineering, Kahramanmaraş İstiklal University, Kahramanmaraş, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-0000-8411

^b Software Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-3734-8807

Abstract

A well-known problem in control system design and analysis is the shaping of the unit step reference response of a system to produce desired transient characteristics for various system references. The necessity of having fast, accurate, and stable control systems for a large number of practical applications has created the need for advanced control methods. In this regard, the development of fractional-order controllers has received considerable attention from the control community. Many papers and books on the topic of fractional-order systems have been published, which also include the usefulness of fractional calculus in the area of controllers. The fractional order proportional integral derivative controller is proven to be versatile, and its design can be obtained for any given target step response. A sufficiently large number of response characteristics, such as performance, phase margin, immunity to plant modeling, and robustness, can be adjusted by means of five tuning parameters. The control strategy of this paper focuses on developing a fractional order proportional integral derivative controller, which aims at overcoming the infeasibility of the controller to satisfy the conflicting goals of go-to speed and settling time in the traditional PID controller. The controller design has two main goals: one is to satisfy system stability, while the other is tuning the overshoot and the settling time. In this direction, the genetic algorithm is implemented. The results are presented through an illustrative example.

Keywords: “PI controller, overshoot, step response, stability, genetic algorithm.”

1. Introduction

Fractional-order mathematics is a branch of applied mathematics focusing on fractional derivatives and integrals of various orders, extending the conventional calculus framework. A study of fractional order mathematics has been growing rapidly in different scientific and engineering fields. One of the main reasons behind the importance of fractional order mathematics is the historical background to this new area of mathematics. Nevertheless, fractional calculus gave way to the new discipline of modern theoretical physics by the end of the 20th century. The mathematical perspective of integer-order differential equations has advanced significantly, but their fractional-order derivatives and integrals are still in their early stages [1]. In today's world, there are several physical systems and processes that cannot be fully understood or described by classical calculus. A more general formulation called fractional calculus, or “Calculus of Non-Integer Order,” was proposed to deal with systems whose properties are “memory dependent” or are of “hereditary nature.” This approach takes inspiration from the Riemann, Grünwald-Letnikov, and Liouville definitions. By extending the power of traditional integrals and derivatives to non-integer values, many have explored the applicability of fractional order mathematics in various applications. It provides a local description of the classified energy distribution, degree of association, roughness spectrum, and so on in terms of time or frequency domain, which is more suitable for many physical processes [2]. Traditional calculus is designed to handle homogeneous, instantaneous processes with constant properties. There are many physical, mechanical, biological, electrical, chemical, air-water pollution controls, economic, and financial systems with different types of infinitely distributed or grouped media and material characteristics, operating continuously in relaxed states of nature. Such systems are solved using non-integer order calculus-like tools. It expands the scope of conventional calculus to describe many complex systems that are solved by undetermined integral coefficient linear, nonlinear, and fractional differential equations [3].

A control system is a system that measures the process states and provides corrective actions such that the process is carried out in a desired degree of stability, performance, and accuracy. The feedback mechanism has an instrumental role in several control strategies to determine the corrective actions or the manipulative inputs required by a process or output or system state

¹ Corresponding Author
E-mail Address: bilal.senol@aksaray.edu.tr

objective. Classical control theory is perhaps the longest surviving control systems design paradigm, spanning three centuries. It was and indeed continues to be the cornerstone behind many control systems designs, many of which are still in operation today [4]. Since the start of control theory, simple (integer) order differential equations governed the standard of the time. They provide a minimal complexity system that is often used to simulate the output of real systems and act as a control mechanism in modern constructions. The primary argument for eliminating any other order comes mostly from technical limitations of the discipline and that additions to the normal linear and non-linear feedback, model moving components, can provide a better overall performance. The extension of control systems to fractional order is one way to insert these omitted components and provide enhanced performance and dynamics [5]. By considering a system in a fractional context, a number of advantages can be found. Improved accuracy of modeling mechanisms, simulation outputs, and the prediction of dynamic responses to a given control input is the first of these. It also opens the door for greater flexibility, since real physical systems constitute a mixture (or sum) of orders, and obscurities could be modeled in any simulations. The representation of a system in state-space gives a more detailed investigation into the makeup of a dynamic model, especially in one where the state contains an infinitesimal component. Fractional orders therefore present a more accurate reflection of the dynamic behavior, something integer controllers do not provide, giving a system with a fractional representation an edge in terms of capturing and reflecting its dynamic behavior [6]. One aspect that is shared within all feedback control systems, however, is the desire to analyze and ensure stability. For fractional closed-loop systems, stability does have its limitations, and it has seen work in more advanced domains, attacking stability through various methods. Each of these methods is a prime motivator for systems in industry, striving for a clearer, more detailed picture for their control dynamics, yielding controllers capable of improved performance from integer proportional-integral-derivative (PID) structures [7].

Stability analysis is undoubtedly the main part of control systems theory. Approximately 90% of engineering time in control engineering is occupied with the analysis of stability. It's one of the biggest research areas in engineering. But in the last few years, advances in the field of fractional differential equations have generated increasing interest in the study of various fractional order controllers [8]. Stability is the key aspect of fractional order control systems due to the involvement of the fractional derivative during the tuning of the fractional controller. There are many methods available to investigate the stability of fractional order control systems [9].

Step response analysis is a fundamental tool for understanding how linear time-invariant systems behave when they are subjected to a step input. The insights and conclusions drawn from the step response can subsequently be translated to any generic function of time through time-invariance. The purpose of step response analysis is to be able to understand the performance of a system over a long period of time; however, the impetus for the analysis comes from the transition that takes place from an initial to a steady-state operating condition due to an abrupt input change [10]. To aid in that understanding, a number of analytic and graphical tools are available. Other types of response analyses consider the immediate response of a system to a change in input or its time- or frequency-domain harmonic speed, respectively. In other words, step response analysis identifies the dynamic behavior of a system for all time instants, not only for small values of time [11]. In step response analysis, the system output behavior when introducing a step input to a system is studied. A step response is the system's output when the input switches from one constant level to another. The output of the system varies with time, and its behavior can be known from the following data: output values, the time at which the output changes, how long it takes for the system to reach stable output, the nature of the system's transient response, and whether the system output oscillates or not. A step input is a signal that starts at some initial value and jumps instantly to one of its final steady-state values. The behavior of the system is characterized by the time constant, which depends on the type of system [12]. A step response is generally concerned with, but not limited to, the following indices: Rise Time (T_r): the amount of time required for the response to rise from some initial pre-determined level to some final pre-determined level. Overshoot (OM): the greatest amount above unity that any overshoot in the response can achieve. Settling Time (T_s): the time required for the step response to settle within a particular error band for the remainder of the analysis. Steady-state error (SSE) is the difference between the desired value and the actual value when the time reaches infinity. In mathematical form, it is defined as the difference between the desired value and the real response as time approaches infinity [13].

In a wide range of practical engineering and technical systems, it is sometimes necessary to have a certain dynamic behavior in order to manage their actions. Here comes the basic aim of a control system, where the function of managing this behavior is done by a controller inside the system. By selecting several controller actions, one can define which features are its main goals that need to be managed by the system. In the open-loop case, where the system is isolated from the controller, the system isn't capable of managing and adjusting its behavior according to the input signal. However, if we attach a controller in the path of the system, the control action will start to regulate the system's behavior. However, controllers have different distinct structures and actions. Proportional (P), proportional-integral (PI), proportional-derivative (PD), and PID are all examples of the operating actions of the controllers, which represent the control actions of a proportional controller, an integral action, a derivative action, and a combination of all mentioned actions. Fractional or non-integer controllers are the natural evolution of classical PID controllers for managing today's complex control problems. The classical PID controller's integer order calculus has limited adaptability and flexibility vis-à-vis fractional order derivatives; hence, the fractional order PID (FOPID) controllers are able to provide improved performance. There are a number of significant differences between a classical PID and its fractional version in terms of operational requirements. The controller is a multi-input, multi-output system. It is generally too complex to be analytically described in a traditional form; hence, a direct tuning rule is not yet found. A few years ago, it was only the

speculative theories that described the possible benefits of using fractional differentiation in industrial control theory and practice, but today it finds a big list [14, 15].

Controller tuning plays an important role in the design of many applications, such as chemical reactors, robot manipulators, and automotive systems. System uncertainties, nonlinearities, and dynamic changes that occur in many of these systems dictate the employment of precisely tuned controllers. These design applications virtually demand the use of feedback controllers to maintain the system characteristics so that it operates effectively. A well-tuned controller can improve performance by influencing both the setpoint tracking and transient responses. Genetic algorithms have recently received much attention for the tuning of controllers because they are capable of handling a non-differentiable scalar-valued function [16]. It is an especially efficient optimization method for searching the global optimum. Moreover, the genetic algorithm has faster computation times than other evolutionary strategies. In general, researchers have applied genetic algorithms and evolutionary strategies to the control of robotic manipulators, chemical processes, and aircraft guidance systems. The main purpose of this essay is to investigate the different methods and techniques that have been employed to achieve the optimal tuning of controllers using genetic algorithms in optimization. In the following sections, fuzzy logic, neural networks, a comparative introduction, and tuning methods will be explained before approaching the main concept of the genetic algorithm and controller tuning, followed by methodologies, experimental results, and conclusion. The need for exactly tuned controllers is described. Control strategies that benefit from exactly tuned controllers are discussed [17].

This paper aims to tune the fractional order FOPID controller to set the properties of the step response to researcher's desire. For this purpose, the genetic algorithm (GA) is implemented. Here, second section briefly reminds the FOPID controller and the step response. Third section gives information about the GA and the case study is presented in section 4. The last section has the conclusions.

2. The Step Response and FOPID Controller

The step response of a system measures how it changes with time after receiving a unit step input. Understanding the step response has both theoretical and practical importance in the field of control engineering. A system's step response can provide valuable insight into its properties and is a great way to verify its behavior. For a physical system, a step input can manifest in various forms such as a sudden gust of wind, a person applying a force on an object, or a jet pilot inadvertently commanding a quick turn. Also referred to as the jump response, this behavior is primarily studied to gauge a system's stability, and quantitative analysis of the system's response is done concerning time [18]. Fig. 1 shows a sample step response [19].

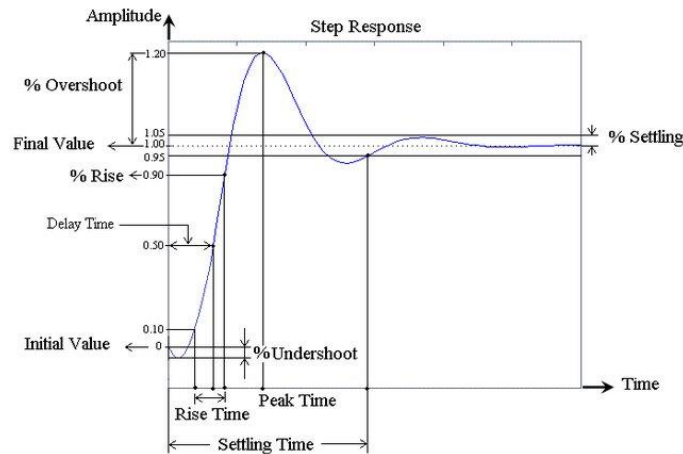


Fig. 1. An example step response.

The rise time of the system output is the time it takes for the response to go from 0% to 100% of its final value. The overshoot is the percentage by which the system output “overshoots” its final value. The settling time is the time it takes for the system response to reach and stay within a given percentage of its final value. Finally, the peak time is the time it takes for the output to reach the point of the first peak. The settling time, rise time, and overshoot are performance indicators that can be employed to analyze a number of different system performance characteristics. Each one of these parameters can be analyzed to draw performance inferences about a given dynamic system. By exploring the significance and interrelationship of these characteristics, one can better understand the stability and relative responsiveness of particular systems. For example, quick rise times and low overshoots correspond to systems that are both stable and fast. Moreover, changes in system parameters can affect the remaining parameters and the overall performance of the system. An increase in one parameter may be desirable, while in another the opposite may be true. For example, a rise time that is too long may cause an undesirable amount of overshoot [20].

Following is the transfer function of a FOPID controller.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s^\lambda} + k_d s^\mu \quad (1)$$

It would be useful to give information about how the fractional-order terms (the integral order λ and derivative order μ) influence the controller's flexibility in adjusting transient response parameters. The fractional-order terms, denoted by the integral order (λ) and the derivative order (μ), are crucial in endowing the FOPID controller with its unique flexibility and resilience. These parameters provide more precise modifications to the system's phase margin and gain crossover frequency, therefore enhancing stability margins relative to traditional PID controllers. The memory effect intrinsic to fractional calculus offers a distinct benefit in adjusting the system's response dynamics, leading to smoother transitions, less oscillations, and enhanced tracking performance. This improved tunability is especially beneficial in situations when competing performance goals, such as reducing overshoot while attaining a faster settling time, need to be satisfied. In contrast to integer-order controllers, which are limited by fixed-order calculus, fractional-order parameters provide a wider spectrum of response shaping, rendering the FOPID controller an effective instrument for tackling intricate control demands. We have provided examples and references to essential literature to elucidate these ideas, enabling readers to comprehend the theoretical foundations and practical ramifications of these terminology. We anticipate that this thorough elucidation adequately responds to the comment and enhances the overall comprehensiveness of the study.

3. The Genetic Algorithm

Genetic algorithms are powerful optimization methods that are frequently used to solve a wide variety of complex engineering optimization problems. The general flowchart of GA is given in Fig. 2 [22].

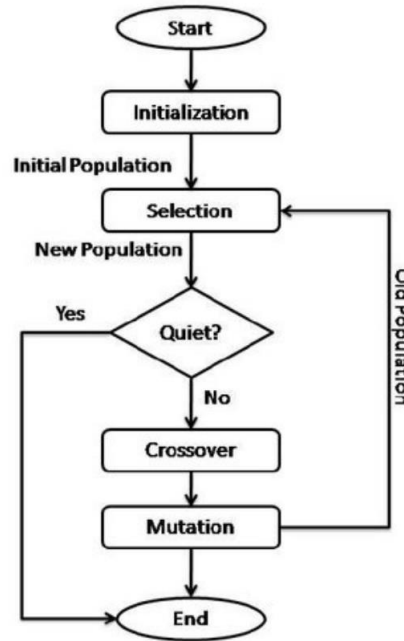


Fig. 2. The flowchart of the GA.

Since one of the aims of this text is to employ a GA to tune a PI controller for controlling a simple system, a solid foundation in genetic algorithms is required to know more about the tuning process. This text attempts to discuss the fundamentals of GAs and some of the various ways they can be used. A GA works with a population of chromosomes that represent the solutions of the variables being optimized at any given moment. Each chromosome is formed from a specific number of genes, where each gene is a decision variable within the optimization problem. These chromosomes evolve through a series of generations that become more and more optimized. When an optimization problem is first initialized, the population of chromosomes is usually generated randomly. Over time, these chromosomes go through a process whereby a new generation of solutions is created. Chromosomes evolve in order to get the best solutions. The major factors influencing this evolution process are the initial population, the fitness functions, and genetic operators [21]. Each chromosome is evaluated for its fitness with respect to the problem's objectives using a fitness function. High fitness values represent good solutions, and low values represent poor solutions. Ultimately, the GA is trying to evolve a population of chromosomes where the majority have high fitness values. A selection process based on the fitness of each chromosome, known as survivor selection, is essential to ensure the best

individuals survive in each generation. This selection process mimics the principles of natural selection by allowing the most successful individuals to survive in the population and have the chance to produce offspring. Algorithm parameters, like population size, mutation rate, and crossover probability, are key components that critically affect how the genetic algorithm will work in solving the problem.

In GA, candidate solutions are represented as chromosomes, with the collection of all chromosomes forming a genetic pool. Each chromosome's fitness value indicates its suitability as a solution, affecting its likelihood of being selected for reproduction. Chromosomes with higher fitness values have a greater probability of survival, as they are more likely to contribute to the creation of new solutions. To generate new candidate solutions, GA applies genetic operations like crossover (recombination) and mutation. Crossover combines information from two parent chromosomes to create offspring, while mutation introduces small, random changes. These processes promote diversity within the pool, expanding the search space and enabling exploration of a broad range of possible solutions. GA's selection process prioritizes chromosomes with higher fitness values, ensuring that more promising candidates are retained. By iteratively repeating selection, crossover, and mutation, the population evolves, progressively converging toward an optimal or near-optimal solution. The algorithm concludes when certain termination criteria are met, such as reaching an adequate fitness level or a specified number of generations. Through this iterative, evolutionary approach, GA effectively searches complex solution landscapes, identifying highly optimal solutions.

Now, let us study the problem on an example.

4. The Study

Let us consider the following transfer function.

$$P(s) = \frac{K}{T_s^\alpha + 1} e^{-Ls} \quad (2)$$

The order of the numerator polynomial here is also a real number which yields to a fractional order plant. The parameters of the plant are, $K=0.99932$, $T=1.0842$, $L=0.1922$ and $\alpha=1.0132$. The plant also has an internal delay which is represented by the parameter L . Initially, the overshoot of the step response is set to be 25%. In other words, the peak of the step response is tuned to be 1.25. At the same time, the steady state time is set to be 2.5 seconds. Besides, the most important property to be achieved is the stability. For these constraints, the following FOPID controller is calculated.

$$C_1(s) = -10.8481 + \frac{64.6632}{s^{0.73025}} + 2.0334s^{0.57381} \quad (3)$$

With the FOPID controller above, the step response in Fig. 3 has been obtained.

The step response clearly shows that the stability is successfully achieved. Besides, the peak point of the step response is on 1.25 and the response reaches steady state at approximately 2.5 seconds. For comparison, the same objectives were considered, and a classical integer-order PID controller was re-tuned using the GA. The optimized controller is given in the following form.

$$C_2(s) = 1.3139 + \frac{4.1171}{s} + 0.34915s \quad (4)$$

Step response obtained in this case is given in Fig. 4. This figure shows that the overshoot requirement is successfully met. However, the system showed a slower settling time in which the system reached the steady state in more than 2.5 seconds. Thus, it can be said that the fractional order controller showed better performance in satisfying time domain specifications. It was proven in the previous studies that the integral operator of the controller has significant effect on the steady state of the system. Since the integral operator of the fractional order controller has a fine-tuning ability because of the real order, the time domain response could be achieved in a more convenient way.

This time, no overshoot is wanted in the step response. Also, the rise time is desired to be 1 seconds and settling time is set to be 3 seconds. In this direction, the following FOPID controller is calculated.

$$C_3(s) = 8.0337 + \frac{35.9335}{s^{0.70419}} + 18.2109s^{0.66562} \quad (5)$$

The step response obtained with the above controller is given in Fig. 5. It is clear in the figure that desired specifications have been successfully met.

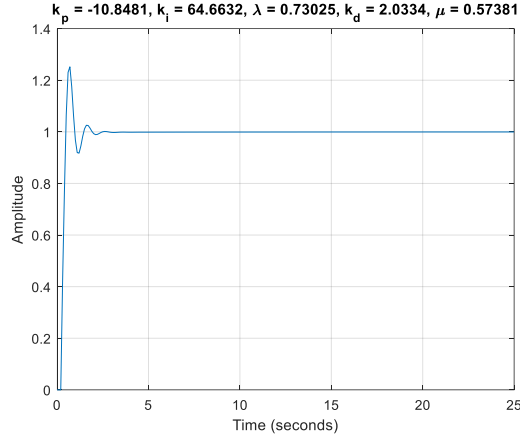


Fig. 3. Step response obtained with $C_1(s)$.

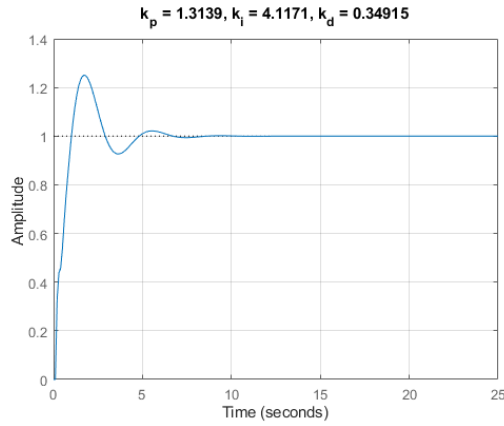


Fig. 4. Step response obtained with $C_2(s)$.

Again for the same specifications, following PID controller has been tuned with the GA.

$$C_4(s) = 4.0128 + \frac{3.3411}{s} + 0.44433s \quad (6)$$

The step response of the system controlled with $C_4(s)$ is given in Fig. 6. It is clearly seen when comparing Fig. 5 and Fig. 6 that the fractional order controller showed a smoother response in rise time although the desired specifications were largely met.

Finally, let us tune the overshoot to reach the point 1.1 having the peak time to be 1 second. It means that the step response will reach the peak point in 1 second. The settling time in this case is 5 seconds. FOPID controller obtained for this purpose is given below.

$$C_5(s) = 7.5493 + \frac{49.1058}{s^{1.3452}} + 2.5977s^{0.58411} \quad (7)$$

The step response is given in Fig. 7.

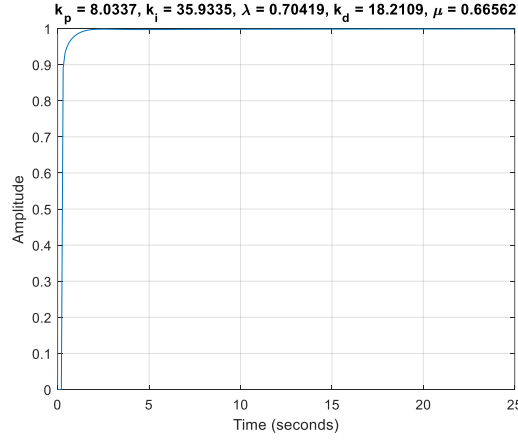


Fig. 5. Step response obtained with $C_3(s)$.

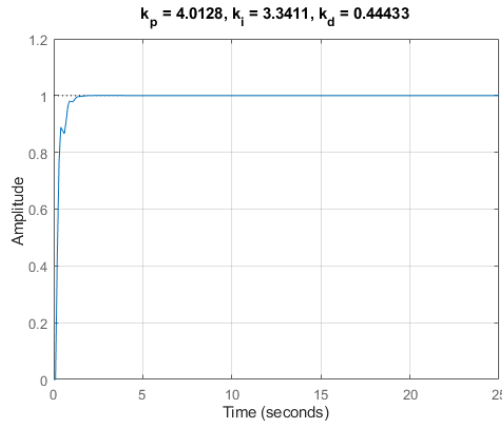


Fig. 6. Step response obtained with $C_4(s)$.

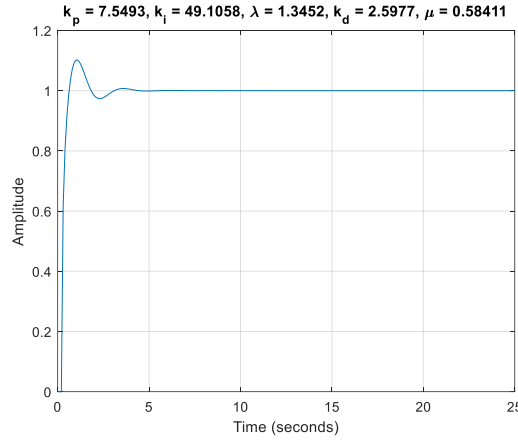


Fig. 7. Step response obtained with $C_5(s)$.

The figure demonstrates that the specified requirements are successfully met. Thus, the effectiveness of the method are shown in 3 different cases. Before proceeding to the next section, it would be better to provide more information on how the GA parameters were chosen. In the study, the population size of 50 was selected to optimize computing efficiency and genetic variety. A sufficiently large population guarantees that the method investigates an extensive solution space while minimizing computing expenses, which is essential for real-time or resource-limited applications. The mutation rate was established at 5%, a figure obtained from empirical research in optimization literature. This rate ensures adequate heterogeneity throughout the population, enabling the algorithm to prevent premature convergence to local optima while maintaining a steady advancement toward the global solution. The crossover probability, an essential element in recombination, was established at 80%, guaranteeing that most offspring acquire advantageous features from their progenitors. This elevated likelihood enhances convergence by using optimal solutions while preserving sufficient randomness to investigate new options. Tournament selection

was utilized as the selection method, a well-established strategy known for promoting competition among chromosomes. This approach guarantees that the most fit individuals have a higher probability of reproduction, hence facilitating the exploitation of superior solutions and the exploration of the search space. The termination criteria were established to optimize computational efficiency and effectiveness. The method was programmed to conclude either upon achieving a specified fitness threshold or after 200 generations, a limit established to permit adequate iterations for convergence while preventing excessive computing burden.

5. Conclusions and Discussion

In recent years, the field of control system design and analysis has encountered a noteworthy issue, particularly in relation to adjusting a system's response when faced with a unit step reference. This adjustment aims to achieve specific transient characteristics for various system references, taking into account the diverse demands of practical applications that require fast, precise, and stable control systems. Consequently, there has been increasing interest within the control community towards the development of advanced control methods, specifically fractional-order controllers. Numerous scholarly works, including papers and books, have contributed significantly to the literature on fractional-order systems, as they emphasize the value of fractional calculus in controller applications. Among the different types of fractional-order controllers, the fractional-order proportional-integral-derivative (FOPID) controller has proven its adaptability by successfully achieving desired step responses. This achievement is made possible through the adjustment of five tuning parameters, which collectively influence a wide range of response characteristics such as performance, phase margin, immunity to plant modeling, and robustness. The focus of this paper is to delve into the development of a FOPID controller, which aims to overcome the limitations of traditional PID controllers when it comes to meeting both rapid response and settling time requirements. The primary objectives of this controller design are to ensure the stability of the system, while concurrently fine-tuning overshoot and settling time. This study illustrates that including fractional orders in controller design provides notable benefits compared to traditional integer-order controllers, especially in modulating the transient response. Fractional orders provide more degrees of freedom via the integral order (λ) and derivative order (μ), enabling more accurate adjustment of system dynamics. Fractional-order controllers provide smoother rising times, less overshoot, and expedited settling periods relative to integer-order controllers, even when both are tuned under analogous conditions. The enhancement is apparent in the step response plots, where the fractional-order controller consistently meets rigorous time-domain criteria with more efficacy. The fine-tuning capabilities of fractional operators, due to their non-integer flexibility, enables the system to more effectively balance conflicting objectives, such as reducing overshoot while maintaining settling time. Conversely, conventional PID controllers are restricted by fixed-order calculus, which hinders their flexibility and frequently leads to inferior performance, particularly in complex or nonlinear systems. The study's results demonstrate that fractional controllers improve stability margins and deliver enhanced performance in achieving multi-objective requirements, rendering them a formidable option for advanced control applications. To accomplish this, the researchers employ the use of a genetic algorithm, which proves to be effective in identifying the optimal tuning parameters. Throughout the paper, detailed examples are provided to demonstrate the exceptional effectiveness of the proposed FOPID controller in meeting the targeted performance criteria. With the study in this paper a FOPID controller has been designed using the genetic algorithm approach. The five parameters of the controller are tuned to satisfy multi-objectives in the step response of the system. The step response includes properties like rise time, overshoot, peak time, settling time and steady state. The method is told to be a multi-objective approach in that more than one of these properties are tried to be satisfied simultaneously. As the result, the step response could be shaped towards system requirements. The effectiveness of the method has been shown on an illustrative example including different cases. This study aims to serve as an enlightening reference for researchers exploring controller tuning.

References

- [1] H. M. Srivastava, "Fractional-order derivatives and integrals: Introductory overview and recent developments," *Kyungpook Mathematical Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 73-116, 2020.
- [2] D. Baleanu, Y. Karaca, L. Vázquez, and J. E. Macías-Díaz, "Advanced fractional calculus, differential equations and neural networks: Analysis, modeling and numerical computations," *Physica Scripta*, vol. 98, no. 11, p. 110201, 2023.
- [3] C. A. Valentim, J. A. Rabi, and S. A. David, "Fractional mathematical oncology: On the potential of non-integer order calculus applied to interdisciplinary models," *Biosystems*, vol. 204, p. 104377, 2021.
- [4] Y. Liu, A. K. Singh, J. Zhao, A. S. Meliopoulos, B. Pal, M. A. bin Mohd Ariff, ... and S. Yu, "Dynamic state estimation for power system control and protection," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 5909-5921, 2021.
- [5] H. Jahanshahi, A. Yousefpour, J. M. Munoz-Pacheco, I. Moroz, Z. Wei, and O. Castillo, "A new multi-stable fractional-order four-dimensional system with self-excited and hidden chaotic attractors: Dynamic analysis and adaptive synchronization using a novel fuzzy adaptive sliding mode control method," *Applied Soft Computing*, vol. 87, p. 105943, 2020.
- [6] X. Leng, S. Gu, Q. Peng, and B. Du, "Study on a four-dimensional fractional-order system with dissipative and conservative properties," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 150, p. 111185, 2021.

- [7] M. Fiuzy and S. Shamaghdari, "Stability analysis of fractional-order linear system with PID controller in the output feedback structure subject to input saturation," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 10, no. 2, pp. 511-524, 2022.
- [8] C. I. Muresan, I. Birs, C. Ionescu, E. H. Dulf, and R. De Keyser, "A review of recent developments in autotuning methods for fractional-order controllers," *Fractals and Fractional*, vol. 6, no. 1, p. 37, 2022.
- [9] E. A. Mohamed, E. M. Ahmed, A. Elmelegi, M. Aly, O. Elbaksawi, and A. A. A. Mohamed, "An optimized hybrid fractional order controller for frequency regulation in multi-area power systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 213899-213915, 2020.
- [10] Jankovic, G. Chaudhary, and F. Goia, "Designing the design of experiments (DOE)—An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems," *Energy and Buildings*, vol. 250, p. 111298, 2021.
- [11] X. Rui, J. Zhang, X. Wang, B. Rong, B. He, and Z. Jin, "Multibody system transfer matrix method: the past, the present, and the future," *International Journal of Mechanical Systems Dynamics*, vol. 2, no. 1, pp. 3-26, 2022.
- [12] R. Barzegarkhoo, M. Forouzesh, S. S. Lee, F. Blaabjerg, and Y. P. Siwakoti, "Switched-capacitor multilevel inverters: A comprehensive review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 9, pp. 11209-11243, 2022.
- [13] J. Machowski, Z. Lubosny, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, John Wiley & Sons, 2020.
- [14] M. Batiha, O. Y. Ababneh, A. A. Al-Nana, W. G. Alshanti, S. Alshorm, and S. Momani, "A numerical implementation of fractional-order PID controllers for autonomous vehicles," *Axioms*, vol. 12, no. 3, p. 306, 2023.
- [15] R. Shalaby, M. El-Hossainy, B. Abo-Zalam, and T. A. Mahmoud, "Optimal fractional-order PID controller based on fractional-order actor-critic algorithm," *Neural Computing and Applications*, vol. 35, no. 3, pp. 2347-2380, 2023.
- [16] N. A. Ahmed, S. Abdul Rahman, and B. N. Alajmi, "Optimal controller tuning for P&O maximum power point tracking of PV systems using genetic and cuckoo search algorithms," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 10, 2021.
- [17] C. Yao, Y. Li, M. D. Ansari, M. A. Talab, and A. Verma, "Optimization of industrial process parameter control using improved genetic algorithm for industrial robot," *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics*, vol. 13, no. 1, pp. 67-75, 2022.
- [18] H. Wu, Z. Hu, and X. Du, "Time-dependent system reliability analysis with second-order reliability method," *Journal of Mechanical Design*, vol. 143, no. 3, p. 031101, 2021.
- [19] M. B. Bayram, H. İ. Bülbül, C. Can, and R. Bayindir, "Matlab/GUI based basic design principles of PID controller in AVR," in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1017-1022, 2013.
- [20] M. H. Lipu, M. A. Hannan, T. F. Karim, A. Hussain, M. H. M. Saad, A. Ayob, ... and T. I. Mahlia, "Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook," *Journal of Cleaner Production*, vol. 292, p. 126044, 2021.
- [21] G. Acampora, A. Chiatto, and A. Vitiello, "Genetic algorithms as classical optimizer for the quantum approximate optimization algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 142, p. 110296, 2023.
- [22] Dastanpour, S. Ibrahim, R. Mashinchi, and A. Selamat, "Using genetic algorithm to support artificial neural network for intrusion detection system," *Journal of Communication and Computer*, vol. 11, pp. 143-147, 2014.

An Interactive and Advanced Online Exam Platform For Both Teachers and Students

Emre Avuçlu ^{a,1}, Selahattin Özdemir ^b

^a Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-1622-9059

^b Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye
ORCID ID: 0009-0000-8112-8169

Abstract

The world of education is constantly transforming with the advancement of technology. Today, in addition to traditional methods, digital tools have begun to be widely used to support education and training processes. In this context, online electronic quiz applications play a very important role in evaluating student performance and enriching the learning experience. In this study, an online quiz application was developed using nextjs, tailwindcss and prisma technologies, respectively. The app introduced a solution that allows teachers to create interactive and customizable quizzes for their lessons. Our application offers teachers the flexibility to determine the desired number of questions for each quiz, along with the option to choose courses and topics. Additionally, teachers can add and edit their own questions. Teachers can evaluate students' in-depth understanding with questions they select from a wide pool of questions and create quizzes that suit their learning objectives. By adding their own questions, teachers can create quizzes that better suit course materials and student needs, further personalizing students' learning. In this way, both the student and the teacher can apply the quiz efficiently and quickly.

Keywords: “Education, nextjs, online quiz.”

1. Introduction

With developing technology, the way and speed of accessing information has also changed. Today, the most common method used to access information in the easiest way is the internet. Distance education and distance exam applications are now carried out over the internet [1]. Online online exams are known as an administration method in which exam content is distributed, analyzed and reported using the Internet. It is very important for both the student and the teacher to check the measurement and evaluation results correctly. It is known that traditional assessment and evaluation and many different alternative tools are used to evaluate student success [2]. Secure field exams go beyond browser-based testing to ensure the safety of test items and are carried out in test centers that require high levels of security or in specially designated places such as high schools and conference centers [3]. In a different study, the features of a web-based exam were determined in detail [4]. Using elements such as videos in online education can help both those with limited literacy skills and individuals with a visual learning style [5]. In a different study, it was emphasized that student monitoring tools in web-based exam systems should be easy, fast and usable [6]. In a study of online exams, it was reported that there was a small difference between students' choice of web-based assessment and the traditional method [7]. It has been reported that there are some limitations encountered in online exams. Some of these include exams requiring computer and internet access, as well as security issues [8]. Measurement and evaluation are used effectively in planning and directing education and measuring students' success [9]. Compared to classical tests, interactive multimedia tests reflect the student's learning performance better [10]. Karakaya stated that there are many academic studies on online exam systems. It has been reported that online examination systems also increase the quality of learning in many cases, compared to classical methods, depending on the field of use, purpose, size and student profile [11]. Distance education is used at all levels of formal and non-formal education systems in the education systems of nations around the world [12]. Applications have revealed that people's test results on the internet are almost the same as their test results in the classroom environment, and that students prefer tests on the internet [13-14]. An online web-based file tracking system for lawyers was developed [15]. A detailed web-based advanced taxi appointment management system was developed [16]. A web-based expert system-based application was made in a different field [17].

¹ Corresponding Author
E-mail Address: emreavuculu@aksaray.edu.tr

This study differs from other studies in that it offers personalized experience, advanced analytics and reporting, real-time interaction, and different exam types and formats. The aim of this study is to develop a safe, effective and efficient online exam model for teachers and students to conduct and evaluate exams.

2. Material and Methods

The software technologies used in this study are as follows;

Next.js: Next.js, a React-based framework, enables the development of SEO-friendly, fast web applications with features such as server-side rendering and static site generation.

TailwindCSS: It is a utility-first CSS framework, meaning it offers the ability to quickly style using ready-made classes. In this way, developers can create more flexible and customizable designs.

Prisma: It is a modern ORM (Object-Relational Mapping) tool, used to facilitate and optimize database operations. It offers developers the opportunity to write type safety and efficient queries when working with SQL databases.

In this study, a dynamic online quiz software was developed. The technologies used to perform the work are nextjs, tailwindcss and prisma. The interfaces and explanations of the developed web-based application are made respectively. The general interface of the application is shown in Fig. 1.



Fig. 1. General Interface

A useful interface has been developed where teachers can see how many students, how many questions, how many classes and categories there are and where they can easily access other tools. The database relationships of the developed application are shown in Fig. 2.

Quiz-quizuser Relationship:

- When creating a quiz, a quizuser table is created for each user, so there is a one-to-many relationship.
- The id column of the quiz table references the quiz table as foreign.

Quiz-user Relationship:

- A user can have more than one quiz, and since a quiz can also have more than one user, there is a many-to-many relationship.
- The id column of the user table and the id column of the quiz table are located in the userquiz table as foreign keys.

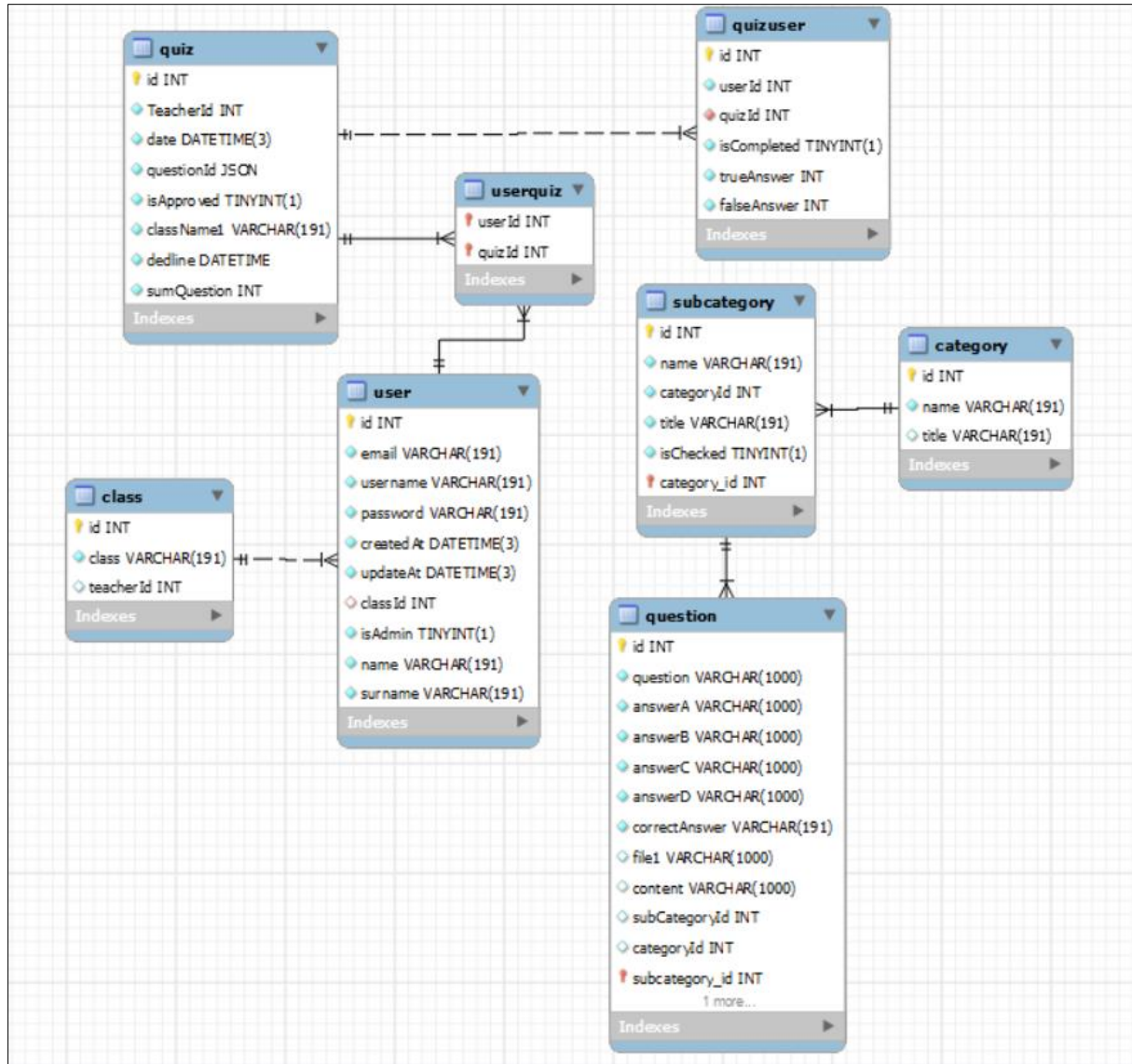


Fig. 2. Relationships between tables

User-class Relationship:

- Each user can have a class and each class can have more than one user, so there is a one-to-many relationship.
- The id column of the class table references the user table as foreign.

Category-subcategory Relationship:

- While each subcategory can belong to one category, each category can have more than one subcategory.
- The id column of the category table references the subcategory table as foreign.

Question-subcategory Relationship:

- While each question has a subcategory, each subcategory can have more than one question.
- The id column of the subcategory table references the question table as foreign.

The flow diagram of the developed application is shown in Fig. 3.

A part of the code block of the developed application was shown in Algorithm-1. We collect the subcategories selected in the code section into an array. Then, we reach the id part by querying with prisma, and by collecting the id parts in an array and making a where query on the question table, we obtain all the questions belonging to those subcategories, divided into categories. Then, we create the quiz dynamically by randomly selecting as many questions as the number of questions entered by the teacher from each category. Code block-1 in table 1, the code block that is a part of the quiz creation process was shown.

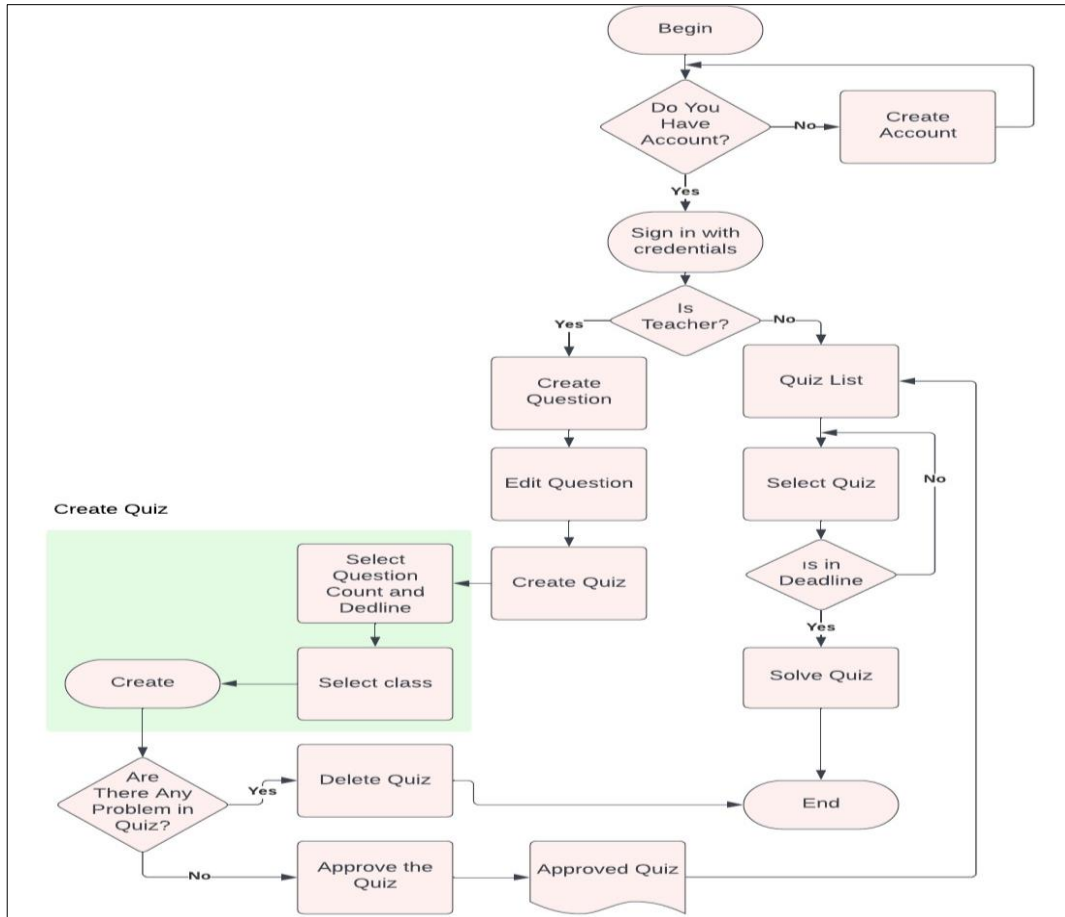


Fig. 3. Flow diagram of the developed application

Table 1. Code Block-1 Quiz Creation

Code Block-1: Quiz Creation
<pre> export const getCheckedSubCategory=async(formData:any)=>{ if(!math && !relegion && !science && !english && !turkish && !history ...))..... if (science) Then {const science1<-science.split(",") science1.map((item:any)=>{ arr.push(item))) end if } const subCategory<-await prisma.subCategory.findMany({ where:{title:{in:[...arr]}}}) const subCategory1<-subCategory.map((item:any)=>{ arr1.push(item.id) await prisma.quiz.create({data<-{ questionId<-[...question1], TeacherId<-teacherId1, className1<-classes, Deadline<-date1.toISOString(), sumQuestion:top } </pre>

Fig. 4 shows the interface where teachers can create class-based quizzes by selecting the number of questions, topic and quiz time.

Matematik	Fen	Türkçe	Din	İnkılap	İngilizce
0	0	0	0	0	0
Veri İşleme ☐	Mevsimler ve iklimler ☐	Dil Bilgisi ☐	Kader İnancı ☐	Bir Kahraman Doğuyor ☐	Friendship ☐
Olasılık ☐	DNA ve Genetik Kod ☐	Sözcükte Anlam ☐	Zekat ve Sadaka ☐	Milli Uyanış: Bağımsızlık Yolunda Atılan Adımlar ☐	Teen Life ☐
Cebir ☐	Basınc ☐	Cümlede Anlam ☐	Din ve Hayat ☐	Milli Bir Destan; Ya İstiklal Ya Ölüm ☐	In the Kitchen ☐
Geometri ve Ölçme ☐	Madde ve Endüstri ☐	Metin Türleri-Söz Sanatları ☐	Hız Muhammed ve Örnekliliği ☐	Çağdaş Türkiye Yolunda Adımlar ☐	On the Phone ☐
Sayılar ve İşlemler ☐	Basit Makineler ☐	Yazım Bilgisi ☐	Kur'an-ı Kerim ve Özellikleri ☐	Çağdaş Türkiye Yolunda Adımlar ☐	The Internet ☐
	Enerji Dönüşümleri ve Çevre Bilimi ☐	Cümlede Anlam ☐		Çağdaş Türkiye Yolunda Adımlar ☐	Adventures ☐
	Elektrik Yükleri ve Elektrik Enerjisi ☐	Anlatım Bozuklukları ☐		Demokratikleşme Çabaları ☐	Tourism ☐
		Parçada Anlam ☐		Atatürk Dönemi Türk Dış Politikası ve Atatürk'ün Ölümü ☐	Chores ☐
					Science ☐
					Natural Forces ☐

Fig. 4. Quiz creation interface

Our app allows teachers to create a quiz by choosing the course topic they want to include and the number of questions per lesson. Exams are assigned on a class-by-class basis and require a specific deadline. Fig. 5 shows an interface with quizzes created by teachers and waiting to be approved. Additionally, teachers can perform various operations through this interface.

IDs	Author	Class	Date	Question Id	İşlem	Deadline
15	Aslan	4-A	Tue, 14 May 2024 06:36:29 GMT	261,256,265,44,36,204,205,200,201,155,147,154,81,79,85,224	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Tue, 14 May 2024 21:58:22 GMT
18	Aslan	4-A	Tue, 14 May 2024 06:39:51 GMT	44	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Tue, 14 May 2024 21:58:22 GMT
19	Aslan	4-A	Tue, 14 May 2024 06:40:28 GMT	73	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Tue, 14 May 2024 21:58:22 GMT
20	Aslan	4-A	Tue, 14 May 2024 07:42:01 GMT	37,43	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Tue, 14 May 2024 21:58:22 GMT
21	Aslan	4-A	Tue, 14 May 2024 07:42:02 GMT	33,34	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Tue, 14 May 2024 21:58:22 GMT
24	Aslan	4-B	Fri, 17 May 2024 15:23:54 GMT	262,259,50,41,39,199,172,101,81,221	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Sun, 26 May 2024 18:23:00 GMT
28	Aslan	4-B	Fri, 17 May 2024 16:37:07 GMT	34,49	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Sat, 18 May 2024 00:42:00 GMT
30	Aslan	4-A	Fri, 17 May 2024 20:18:46 GMT	36,33,150,148	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Fri, 17 May 2024 02:21:00 GMT
32	Aslan	4-A	Fri, 17 May 2024 20:24:05 GMT	35,39,149,151,100,97,91	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Fri, 17 May 2024 02:26:00 GMT
33	Aslan	4-A	Fri, 17 May 2024 20:24:38 GMT	43,49,161,159,89,101,79	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Fri, 17 May 2024 02:26:00 GMT
34	Aslan	4-A	Fri, 17 May 2024 20:27:12 GMT	29,42,160,159,83,99,88	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Fri, 17 May 2024 02:26:00 GMT
35	Aslan	4-A	Fri, 17 May 2024 20:27:46 GMT	46,31,42,155,152,85	dd/mm/yyyy --:-- Approve Go Delete	Fri, 17 May 2024 02:26:00 GMT

Fig. 5. Quiz list for teachers

The quiz list page contains quizzes waiting to be approved. The teacher checks the questions in the quiz and if everything is correct, starts the quiz by choosing a deadline. Fig. 6 shows an interface where teachers can add questions.

Teachers can add questions to the question pool. Fig. 7 shows an interface where questions can be listed and edited.

They can edit the added questions as shown in Fig. 7. Fig. 8 shows an interface with a list of previously solved or expired quizzes created for students.

Question

Option A

Option C

Option C

Option D

Correct Answer (A)

CHOOSE FILE No ...sen

Question Content

Select Category

Select Subcategory

Add

Fig. 6. Question adding interface

Questions									
IDs	Question	Question Content	A	B	C	D	True Answer	Image	Process
1	Buna göre mahalle muhtarı kaç tane su kabı koymuştur ?	Mesut, mahalle muhtarı ile görüşerek evinin bulunduğu sokağın kaldırımlarına kedi ve köpekler için mama kapları koymuştur. Mesut, 180 m uzunluğundaki birbirine paralel kaldırımlardan birine 12'yer metre arayla kediler için, diğerine 15'er metre arayla köpekler için kaldırımların başında ve sonunda karşılıklı birer tane olacak şekilde mama kapları koymuştur. Mahalle muhtarı da karşılıklı aynı hızda bulunan mama kaplarının yanlarına birer tane su kabı koymuştur.	6	8	10	12	B	Boş	Edit
2	Bir günde üretilen kolonyaların tamamının satışından elde edilen gelirin 1 500 TL'den fazla olduğu bilindiğine göre bu satıştan en az kaç TL gelir elde edilmiştir?	Kolonya üreten bir fabrikada iki farklı boyutta kolonya şişesi mevcuttur. Aşağıda biri 200 ml'lik, diğeri 500 ml'lik şişeler içinde satılan kolonyaların satış fiyatları gösterilmiştir. Aşağıda biri 200 ml'lik, diğeri 500 ml'lik şişeler içinde satılan kolonyaların satış fiyatları gösterilmiştir.	1520	1536	1553	1589	B	2.png	Edit
3	Yukarıda 720 sayısının asal çarpanlarına ayrılmış biçimi verilmiştir buna göre aşağıdakilerden hangisi doğrudur?	$720 = 2^4 \cdot 3^2 \cdot 5^1$	b + c toplamı asal sayıdır.	a · b çarpımı asal sayıdır	a tek, b çift sayıdır.	a + b + c toplamı çift sayıdır.	A	Boş	Edit

Fig. 7. Question list interface

IDs	True Answer Count	False Answer Count	Sum Question Count	Deadline	Process
5	2	19	21	Sat, 18 May 2024 21:08:00 GMT	Completed, Ded
7	0	0	23	Fri, 17 May 2024 00:22:00 GMT	Completed, Ded
14	0	0	7	Sat, 18 May 2024 17:43:00 GMT	Completed, Ded
18	2	5	7	Sat, 18 May 2024 17:43:00 GMT	Completed, Ded
23	2	4	6	Sun, 19 May 2024 19:34:00 GMT	Completed, Ded
28	1	3	4	Wed, 22 May 2024 12:43:00 GMT	Completed, Ded
35	0	0	4	Wed, 22 May 2024 12:47:00 GMT	Completed, Ded
40	0	0	4	Wed, 22 May 2024 12:47:00 GMT	Completed, Ded
44	0	0	5	Wed, 22 May 2024 18:30:00 GMT	Completed, Ded
47	0	0	5	Wed, 22 May 2024 18:30:00 GMT	Completed, Ded
54	0	0	5	Wed, 22 May 2024 18:30:00 GMT	Completed, Ded
60	0	0	5	Wed, 22 May 2024 18:30:00 GMT	Completed, Ded

Fig. 8. List of passive quizzes for students

The quiz list for students looks like Fig. 8. From this screen, students can follow their quiz history and scores. Fig. 9 shows the quiz that has not been solved before and has not expired for students.

145	0	0	4	Sun, 26 May 2024 21:19:00 GMT	Completed, Ded
148	0	0	4	Sun, 26 May 2024 21:20:00 GMT	Completed, Ded
154	2	4	6	Mon, 27 May 2024 23:25:00 GMT	Completed, Ded
158	0	0	5	Wed, 29 May 2024 19:37:00 GMT	Go

Fig. 9. Quizzes active for students

If there is a newly added quiz, it will appear as in Fig. 9 and you can start solving the quiz by clicking the go button. Fig. 10 shows the question interface that students use to solve quizzes.

6- By the time the students _____ to the classroom, the teacher _____ all the topics of the day on the blackboard.

A:come/has written

B:had come/was writing

C:came/had written

D:came/had written

Fig. 10. Question view for students

The questions appear as in Fig. 10. Each question must be answered. If the answer is not given, the question cannot be passed. Fig. 11 shows the question to which the student answered incorrectly.

6- By the time the students _____ to the classroom, the teacher _____ all the topics of the day on the blackboard.

A:come/has written

B:had come/was writing

C:came/had written

D:came/had written

[Next](#)

Fig. 11. Wrongly answered question view

If the question is answered incorrectly, it appears as in Fig. 11. Fig. 12 shows the question that the student answered correctly.

If the question is answered correctly, it looks like Fig. 12. Fig. 13 shows an interface where you can see your score and finish the quiz after the quiz is over.

After the quiz is over, the student can see their score, then press the finish quiz button and then return to the quiz list page by clicking "go back".

6- By the time the students _____ to the classroom, the teacher _____ all the topics of the day on the blackboard.

A: come/has written

B: had come/was writing

C: came/had written

D: came/had written

Next

Fig. 12. View of the correctly answered question

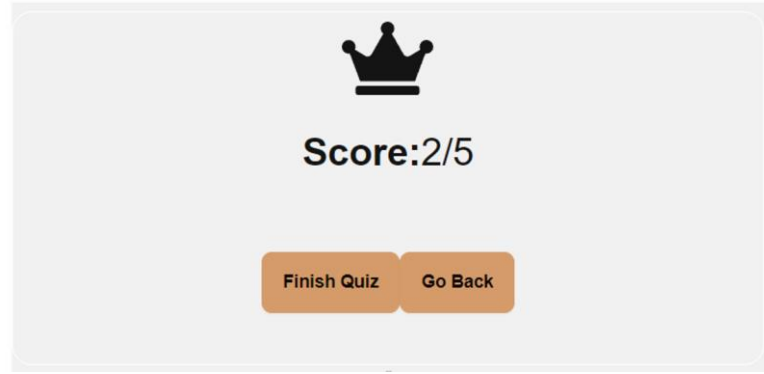


Fig. 13. End of exam interface

3. Conclusions And Future Works

In this study, a detailed and dynamic quiz application was developed. Our web-based application allows teachers to make class-based assignments and deactivate quizzes if they are not solved by the specified date. This process provides teachers with control and monitoring and encourages students to complete quizzes on time. As a result, our electronic quiz app helps teachers and students make their educational process more effective and efficient. It has great potential for tracking student success, customizing the learning experience, and increasing engagement. The ability of teachers to add and edit their own questions to the question pool is important for the dynamic aspect of the application. In future studies, the algorithm of displaying the questions to be answered by the student on the student screen can be realized with online smart exam systems. Add-ons such as artificial intelligence-supported evaluation, rich multimedia content, and gamification can be added to the interface.

References

- [1] Kumalar, M., & Pürtaş, M. (2012). İlköğretim için bir online sınav sistemi önerisi. XIV: Akademik Bilişim Konferansı Bildiri Kitabı, 129-132.
- [2] Yağcı, M., Ekiz, H., & Gelbal, S. (2015). Yeni Bir Çevrimiçi Sınav Modeli Geliştirilmesi Ve Uygulanması. Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi, 16(1), 269-288.
- [3] Hricko, M. , Howell, S. (2006). Online Assessment and Measurement: Foundations and Challenges, p. 51-55.
- [4] Hamilton, L.S., Klein, S.P., Lorie, W. (2005), "Using Web-Based Testing For Large Scale Assessment", Rand Documents, IP:196.
- [5] Sampson, J.P. (2000). Using the İnternet to enhance testing in counseling. Journal of Counseling and Development.
- [6] Bonham W. S., TITUS A., Beichner R. J., Martin L., "Education research using web-based assessment systems", Journal of Research on Computing in Education, 6.
- [7] Carini, R. M., Hayek, J.C., Kuh, G.D., Kennedy, J. M. & Ouimet, J. A. (2003). College student responses to web and paper surveys. Research in Higher Education, (44)1, 119.
- [8] Shuey, S. (2002). Assessing Online Learning in Higher Education. Journal of Instruction Delivery Systems, 16(2).
- [9] Tekin, Halil, Eğitimde Ölçme ve Değerlendirme, Yargı ve Yayınevi, 1996.
- [10] Koong, C. S., WU, C. Y., An Interactive Item Sharing Website for Creating and Conducting On-line Testing, Computers & Education 55 (2010), Pp:131-144.

- [11] Karakaya, Z., Çevirimiçi (On-line) Sınav Sistemi Geliştirilmesi ve Uygulanması, Açık ve Uzaktan Eğitim Sempozyumu Eskişehir, (2002).
- [12] İşman, A., Beach B., LCL Evaluation Report. Türkiye İkinci Uluslararası Uzaktan Eğitim Sempozyumu. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, (1998).
- [13] Bugbee Jr., A. C., Bernt, F. M., Testing by computer: Findings in six years of use 1982- 1988, Journal of Research on Computing in Education, Vol. 23 Issue 1, 87-101, (1990).
- [14] Siemens G., Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age, International Journal of Instructional Technology and Distance Learning, Vol 2. No 1,(2004).
- [15] Avuçlu, E., & Yalçın, S. (2024). A Web-Based Advanced Law Firm Tracking System Application For Lawyers. International Scientific and Vocational Studies Journal, 8(1), 76-86. <https://doi.org/10.47897/bilmes.1495894>
- [16] Avuçlu, E., & Meral, S. (2024). Advanced Web-Based Customer Taxi Appointment Request System. International Scientific and Vocational Studies Journal, 8(1), 65-75. <https://doi.org/10.47897/bilmes.1495877>
- [17] Başçiftçi F., Avuçlu E. (2018). “An expert system design to diagnose cancer by using a new method reduced rule base”. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 157, Pages 113-120, ISSN 0169-2607, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.01.020>.

Spider Wasp Optimization Algorithm

Osman Karataş^a, Celal Yaşar^{b,1}, Hasan Temurtaş^c, Serdar Özyön^d

^a Kütahya Dumlupınar University, Institute of Graduate Education, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0009-0006-3067-1157

^b Kütahya Health Science University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-5069-8545

^c Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0000-0001-6738-3024

^d Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-4469-3908

Abstract

This study aims to improve the performance of the Spider Wasp Optimization (SWO) algorithm, a swarm intelligence algorithm recently introduced in the literature, on various test functions with fixed and variable dimensions. Optimization can be defined as making a system as efficient as possible with minimal cost within certain constraints. Numerous optimization algorithms have been designed in the literature and used to obtain the best solutions for specific problems. The most critical aspects in solving these problems include correctly modeling the problem, determining the problem's parameters and constraints, and finally selecting an appropriate meta-heuristic algorithm to solve the objective function. Not every algorithm is suitable for every problem structure. Some algorithms perform better on fixed-dimension test functions, while others in solving variable-dimension test functions. In this study, the performance of the SWO algorithm was evaluated on 10 test functions previously used in the literature, consisting of three fixed-dimension functions (Schaffer, Himmelblau and Kowalik Functions) and seven variable-dimension functions, including one unimodal function (Elliptic Function) and six multimodal functions (Non-Continuous Rastrigin, Alpine, Levy, Weierstrass, Michalewicz, and Dixon & Price Functions). The solution values obtained for each of the selected functions were compared with the solutions obtained using the Harris Hawks Optimizer (HHO), the Charged System Search (CSS), and the Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA).

Keywords: “Spider wasp optimization, Harris hawks optimizer, charged system search algorithm, backtracking search optimization, fixed and variable size unimodal and multimodal test functions.”

1. Giriş

Bir problemin optimizasyonu, verilen kısıtlar altında o problem için mevcut olan çözümler arasında en iyi olana ulaşmak demektir, kısaca en iyi çözümü bulmaktır. Optimizasyon problemleri mühendislik, tıp, karar verme ve tarım gibi birçok alanda yaygın hale gelmiştir[1-17]. Bu alanlardaki optimizasyon problemlerini çözmek için deterministik yöntemler olarak da bilinen çeşitli geleneksel yöntemler önerilmiştir. Ancak bu yöntemlerin yerel minimumlara yakalanma, gradyan (türev) bilgisi gerektirme, uzun zaman alma ve bazı gerçek dünya optimizasyon problemlerine uygulanamaması gibi dezavantajları vardır. Bu nedenle son kırk yıldan beridir bu problemlerin üstesinden gelmek için çeşitli meta-sezgisel algoritmalar (MA) olarak bilinen modern stokastik teknikler önerilmiştir. Meta-sezgisel algoritmalar tipik olarak biyolojik veya fiziksel olayları taklit eder, doğadan ilham alan MA'lar olarak da bilinir. MA'lar fizik tabanlı, evrim tabanlı, sürü tabanlı ve insan tabanlı olmak üzere dört ana kategoriye ayrılabilir. İlk kategori esas olarak fizik tabanlı MA'lar olarak bilinen MA'ları önermek için fizik kurallarının benzetimi kullanır. Evrim tabanlı MA'lar olarak adlandırılan ikinci kategori, doğadaki doğal evrim sürecinin benzetimini işler. Sürü tabanlı MA'lar olarak bilinen üçüncü kategori, hayvanlarda ve kuşlarda sürü zekasının sosyal davranışlarının benzetimini kullanır. Son kategori ise insanların yaşamlarındaki sosyal davranışlarından esinlenen insan tabanlı MA'lardır [18].

Çalışmada, stokastik optimizasyon için doğadan ilham alan yeni bir sürü tabanlı meta-sezgisel algoritma, yani dişi örümcek arısının avlanma, yuvalama ve çiftleşme davranışlarını taklit etmeye dayanan örümcek arısı optimizasyonu (SWO-Spider Wasp Optimizer) kullanılmıştır. Bu algoritma, örümceği arama, düşen örümceği takip etme ve kaçma, felçli örümceği yuvalama ve dişi örümcek arılarının yumurtasını bırakmak için çiftleşme davranışının benzetimini kullanan dört operatörü içermektedir.

¹ Corresponding Author
E-mail Address: celal_yasar@ksbu.edu.tr

Bu çalışmada SWO algoritması toplamda on adet sabit ve değişken boyutlara sahip unimodal ve multimodal test fonksiyonuna uygulanmıştır. SWO'nun uygulanmasıyla elde edilen sonuçları karşılaştırmak için literatürden üç farklı algoritma seçilerek aynı fonksiyonlara aynı şartlarda uygulanmıştır. Bu çalışma için söz konusu algoritmalar, sürü tabanlı olan Harris şahini optimize edici (HHO-Harris Hawks Optimizer) [19], fizik tabanlı olan yüklü sistem arama algoritması (CSS-Charged System Search Algorithm) [20] ve evrim tabanlı olan geri izleme arama optimizasyon (BSA-Backtracking Search Optimization Algorithm) [21] algoritması olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın literatüre üç temel katkısı bulunmaktadır:

(i) Çalışmada, SWO algoritmasının sabit ve değişken boyutlu, unimodal ve multimodal 10 farklı test fonksiyonu üzerindeki performansı sistematik olarak analiz edilmiştir.

(ii) SWO'nun performansı, farklı temellere dayanan (sürü, fizik ve evrim tabanlı) üç güçlü algoritma ile (HHO, CSS, BSA) kapsamlı biçimde karşılaştırılmıştır.

(iii) Algoritma ile daha önce kullanılmayan farklı test fonksiyonları optimize edilerek, algoritmanın en iyi sonuç verdiği matematiksel model tipi tartışılmıştır. Bu yönleriyle çalışma, SWO'nun farklı test fonksiyonları türlerinde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

1.1. İlgili Çalışmalar

Sui ve arkadaşları çalışmalarında, Çok Stratejili Geliştirilmiş Örümcek Yaban Arısı Optimizasyonu (MISWO) adlı yeni bir algoritmayı önererek mühendislik optimizasyon problemlerine çözüm sunmaktadır. Gri Kurt Algoritması (GWO), adaptif adım boyutu ve Gauss mutasyonu gibi tekniklerle klasik Örümcek Yaban Arısı Optimizasyonu (SWO) algoritmasının performansı iyileştirilmiştir. 23 test fonksiyonu ve 7 mühendislik optimizasyon problemi üzerinde yapılan deneyler, daha hızlı yakınsama, yüksek doğruluk ve stabil performans açısından MISWO'nun diğer optimizasyon algoritmalarına kıyasla üstün sonuçlar verdiğini göstermektedir [22].

Çetinbaş çalışmasında, fotovoltaik (PV) sistemlerin modelleme doğruluğunu artırmak amacıyla Ağırlıklı Lider Arama Algoritmasını (WLS) kullanarak tek, çift ve üç diyotlu PV modellerinin parametre çıkarımını optimize etmiştir. Çalışmada, iki farklı PV hücresine ait 6 model ve altı PV modülüne ait 18 model olmak üzere toplam 24 model analiz edilmiş, WLS algoritmasının etkinliği Örümcek Yaban Arısı Optimizasyonu, Karides ve Gobi Arama, Fennec Tilkisi Optimizasyonu, Kepler Optimizasyonu gibi yedi yeni optimizasyon algoritması ile karşılaştırılmıştır. Friedman ve Wilcoxon sıralı-rank testleri ile yapılan analizler, WLS algoritmasının hata oranı, RMSE ve standart sapma açısından üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur [23].

Çalışmada Liang ve arkadaşları, insansız hava araçları (UAV) için üç boyutlu yol planlamasında Geliştirilmiş Örümcek Yaban Arısı Optimizasyonu (ISWO) algoritmasını önermektedir. SWO algoritmasının nüfus güncelleme formülünü iyileştirerek, Diferansiyel Evrim (DE) ve Kerevit Optimizasyonu Algoritması (COA) ile birleştirmiştir. Ayrıca, karşıt öğrenme stratejisi ile nüfus çeşitliliğini artırarak yerel minimumlara takılma problemini azaltmıştır. 2017 test seti kullanılarak, algoritma dağlık arazilerde UAV rotalarını en aza indirme amacıyla test edilmiştir. Sonuçlar, ISWO'nun daha az iterasyonla daha kısa ve daha güvenli uçuş yolları ürettiğini göstermektedir [24].

Bütün bu çalışmalara ek olarak, SWO algoritması ve bu algoritmanın çeşitli metotlarla geliştirilmiş versiyonları son dönemde literatürde farklı alanlarda birçok problemin çözümünde başarıyla uygulanmıştır [25-30].

2. Doğadaki Örümcek Arısı

Dünyada çoğunlukla tropikal bölgelerde yaygın olarak bulunan örümcek yaban arıları (Pompilidae), Hymenoptera'daki en büyük sivri uçlu yaban arılarından biridir. Dünyada 254 cins ve beş alt familyaya ayrılmış yaklaşık 5000 tanımlanmış Pompilidae familyasında tür vardır. Örümcek arısı, örümceği yavruları için en uygun besin kaynağı olarak kullanan yırtıcı böceklerdir. İsimleri tercih ettikleri avlardan ve benzersiz avlanma davranışlarından gelmektedir. Bu örümcek arısı türü, ince gövdeleri ve dikenli bacaklarıyla karakterize edilir. Bu örümcek arısı türünün birkaç canlı renkli türü vardır, ancak bunlar genellikle mavi veya siyahtır, bazen de metalik parlak olabilir. Siyah renkli dişi bir yaban arısı türü Şekil 1a'da verilmiştir. Bu yaban arıları genellikle çiçek nektarıyla beslenirler veya yerde av ararlar. Dişi örümcek arıları larvaları için yeterli yiyecek sağlamak amacıyla örümcekleri avlarlar [18, 22, 24-30].



Şekil 1. (a) Bir Örümcek arısı dişi; (b) Dişi örümcek arısı felçli bir örümceği açık yuvasına doğru sürükler; (c) Erkek ve dişi örümcek yaban arıları. Dişinin önemli ölçüde daha büyük vücut büyüklüğüne dikkat edin [18].

Dişi örümcek arısı, beslenmek için, kendilerine yeterli avını (örümcek) aramak ve yumurtalarını bırakmak için, yuva aramak için kullanılan benzersiz avlanma ve yuvalama davranışlarına sahiptir. Avlanma davranışı açısından dişi örümcek arısı, çevredeki ortamlarda avlarını rastgele aramak için çeşitli besin arama stratejileri kullanır. Dişi örümcek arısı, larvalarına ev sahipliği yapacak (konakçı) örümcekleri rastgele aramaya başlar. Kısa yolculukların yanı sıra yerde veya yapraklar üzerinde titreyen kanatları ve antenleriyle sürekli hareket halinde yürürler. Uygun bir konakçı örümcek bulunduğunda, dişi örümcek arısı koşarak veya uçarak onu ağının merkezinde kovalamaya başlar ve göğsünün (sefalotoraksının) alt kısmından bir veya daha fazla zehirli ısırmakla onu bastırır. Bu durumda örümcek, ağından yere düşebilir ve larvalarını beslemek için onu felç etmek üzere dişi örümcek arısı tarafından takip edilebilir. Dişi örümcek iğnesini, konakçı olacak örümceğin hareket kabiliyetini etkileyen önemli bir sinir merkezinin yakınına yerleştirir. Bu durumda av ölmez, fakat kalıcı felç halinde kalır. Felç olan örümceğin hareketlerinin durmasından sonra örümcek arısı antenleriyle bu örümceğin yüzeyini keşfetmeye başlar. Daha sonra örümcek arısı felçli örümceği önceden hazırlanmış yuvaya çeker ve altçenesiyle bacakları arasında tutar. Avını (örümceği) önceden hazırlanmış bir yuva üzerinde sürükleyen bir örümcek yaban arısını Şekil 1 (b)'de gösterilmektedir. Ön ayaklarıyla toprağı geriye doğru kazıyarak yuva yapar. Dişi bir örümcek arısı, örümceğin karnına bir yumurta bırakır ve ardından yuvayı kapatır. Birkaç gün sonra örümcek arısının yumurtası çatlar ve konağın (örümceğin) yenilebilir kısımlarını alt çenesini kullanarak tüketmeye başlar. Örümcek arısı larvası, felçli örümceğin üzerinde birkaç gün boyunca gelişir, yetişkin oluncaya kadar çeşitli gelişim aşamalarından geçer ve birkaç hafta sonra yuvadan çıkar. Konakçı örümceğin boyutu, gelişen örümcek arısı larvalarına yiyecek sağlamaya yeterli olmalıdır. Örümcek arıları toprağı kazmak ve içinde hücre inşa etmek veya yaprak veya kayalarda çamurdan yuvalar yapmak gibi çeşitli yuvalama davranışlarına sahiptir. Diğerleri ise örümcek (av) yuvaları veya böcek delikleri gibi önceden var olan yuvaları veya oyukları kullanırlar. Dişi örümcek arısı, av örümceğinin boyutuna bağlı olarak yavrularının cinsiyetini belirleyebilir. Dişi bir örümcek arısı, haplodiploid cinsiyet belirleme sistemini (tüm zar kanatlılarda bulunur) kullanarak yumurtlama sırasında yavrularının cinsiyetini seçebilir. Bu kavram, eğer büyük konaklarda (örümcekler) büyümek dişilerde erkeklerden daha fazla üreme başarısı sağlıyorsa, annelerin çoğunlukla küçük konaklara döllenmemiş yumurtalar (erkekler) ve büyük konaklara döllenmiş yumurtalar (dişiler) bırakması gerektiği anlamına gelir. Bu nedenle, erkeklerin boyutu dişilere kıyasla daha küçüktür. Erkek ve dişi örümcek arısı boyutu Şekil 1.c'de gösterilmektedir. Konağın(örümceğin) ağırlığı larvaların büyümesi ve hayatta kalması için gereklidir. Örümcek arısının hayatta kalamaması, larvaları besleyecek yeterli büyüklükte bir örümceğin bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Küçük bir örümcek konakçı, örümcek arısı larvasına yeterli miktarda yiyecek sağlamayacaktır. Örümcek arılarının kuru bir alanda, özellikle kayaların üzerinde yuva yapması, başka bir böceğin yuvayı keşfetmesi ve larvayı ev sahibiyle birlikte yerken onu yok etmeye çalışması, ayrıca bilinmeyen başka nedenler de dahil olmak üzere çeşitli dış nedenler yuva kurma ve larva büyütme başarısızlığına yol açabilir [18, 22, 24-30].

3. Yöntem: Örümcek Arısı Optimizasyon Algoritması

Bu çalışmada, her örümceğin karnına tek bir yumurta bırakarak bazı örümcek arısı türleri için avlanma ve yuva yapma davranışlarından ve zorunlu kuluçka parazitliğinden esinlenmiş, yeni bir optimizasyon algoritması olan SWO tanıtılmaktadır. Dişi örümcek arıları ilk olarak uygun örümcekler için çevredeki ortamları araştırır. Uygun avı ve yuvaları bulduktan sonra onları felç eder ve yuvalara sürükler. Dişi örümcek arıları uygun avı yuvalara sürükledikten sonra, örümceğin karnına bir yumurta bırakır ve yuvayı kapatırlar. SWO algoritması, arama uzayına belirli sayıda dişi örümcek arısını rastgele dağıtır. Sonra dişi örümcek arılarının her biri, tüm zar kanatlılarda bulunan avlanma ve takip etme davranışları olarak bilinen haplodiploid cinsiyet belirleme sistemi tarafından belirlenen yavrularının cinsiyetine uygun bir örümcek aramak için sürekli hareket halinde arama alanını keşfetmeye devam edeceklerdir. Dişi örümcek arıları, uygun örümcekleri bulduktan sonra ağın merkezlerinde onları yiyecekler ve ağdan düşen örümcekleri ise altı kez yerde arayacaktır. Daha sonra dişi örümcek arısı avına saldırır ve onu önceden hazırlanmış yuvaya sürüklemek için felç etmeye çalışır. Daha sonra dişi örümcek arısı örümceğin karnına bir yumurta bırakarak yuvayı kapatır. Bu algoritma kapsamında arama, takip etme ve kaçma, yuvalama ve çiftleşme davranışları olarak belirtilen örümcek arısı davranışlarının benzetimi gerçekleştirilerek matematiksel modelleri oluşturulacaktır [18, 22, 24-31].

3.1. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

Bu algoritmada, her bir örümcek arısı (dişi), mevcut nesildeki bir çözümü temsil eder ve D boyutlu vektör olarak eşitlik (1)'deki gibi kodlanır.

$$\overrightarrow{SW} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_D] \quad (1)$$

Üst başlangıç parametre sınırı olan $\vec{H}$ ile alt başlangıç parametre sınırı olan $\vec{L}$ değerleri önceden belirlenir ve bu iki değer arasında bir dizi N vektörü eşitlik (2)'deki gibi rastgele oluşturulur [18, 22, 24-30]:

$$SW_{Pop} = \begin{bmatrix} SW_{1,1} & SW_{1,2} & \dots & SW_{1,D} \\ SW_{2,1} & SW_{2,2} & \dots & SW_{2,D} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ SW_{N,1} & SW_{N,2} & \dots & SW_{N,D} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada SW_{Pop} örümcek arılarının başlangıç popülasyonudur. Arama alanında rastgele herhangi bir çözüm oluşturmak için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\overrightarrow{SW}_i^t = \vec{L} + \vec{r} \times (\vec{H} - \vec{L}) \quad (3)$$

Burada t nesil, i nüfus indeksini göstermektedir ($i=1,2,\dots,N$). Denklemdaki $\vec{r}$ ise 0 ile 1 arasında rastgele başlatılan D boyutlu sayılardan oluşan bir vektörü temsil etmektedir.

3.2. Avlanma ve Yuvalama Davranışı

Dişi örümcek arısı, av yolculuğuna larvalarını besleyecek örümceği/avı arayarak başlar. Aramaları, en uygun avı bulmak için arama alanı içerisinde rastgele gerçekleştirilir ve buna arama veya keşif aşaması denir. Sonra avının etrafını sarar ve koşarak ya da uçarak onu kovalar. Bu aşamaya kuşatma ve kovalama aşaması denir. Son olarak, son aşamada ise örümcek arısı yumurtasını felçli örümceğin karnının üzerine bırakmak için onu önceden hazırlanmış yuvaya doğru sürükler [18, 22, 24-30].

3.2.1. Arama Aşaması (Keşif)

Bu aşama, dişi örümcek arılarının, larvalarını beslemek için en uygun örümcekleri bulma davranışlarının benzetimini içerir. Bu aşamada dişi örümcek arısı, yavrularına uygun örümceği bulmak için arama alanını sabit bir adımla rastgele keşfeder. Bu davranış, her dişi örümcek arısının mevcut konumunu her t neslinde sabit bir hareketle güncelleyen ve dişi örümcek arısının keşif davranışının benzetimini içeren Denklem (4)'teki gibi modellenir [18, 22, 24-30].

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \overrightarrow{SW}_i^t + \mu_1 \times (\overrightarrow{SW}_a^t - \overrightarrow{SW}_b^t) \quad (4)$$

Burada a ve b keşif yönünü belirlemek için popülasyondan rastgele seçilen iki indekstir ve bunları dişi örümcek arısı takip eder ve Denklem (5)'teki μ_1 ise o anki mevcut yöndeki sabit hareketi belirlemek için kullanılır. Denklemdaki r_1 sıfır ile bir aralığında ve rn ise normal dağılım kullanılarak oluşturulmuş rastgele sayıları göstermektedir.

$$\mu_1 = |rn| \times r_1 \quad (5)$$

Dişi örümcek arıları bazen ağdan düşen örümceğin izini kaybederler ve bu nedenle örümceğin düştüğü noktanın çevrelediği tüm bölgeyi ararlar. Bu davranışa göre Denklem (4)'teki eşitlikten farklı olarak Denklem (6)'da ifade edilen yeni ve farklı keşif yöntemi oluşturulmuştur. Bunun amacı, algoritmanın düşen örümceğin etrafındaki bölgeleri küçük bir adım büyüklüğü ile keşfetmesini sağlamaktır. Bu denklem ayrıca, düşen örümceğin konumunu temsil etmek üzere popülasyondan rastgele seçilen bir dişi örümcek arısının konumuna göre mevcut dişi örümcek arısının her iterasyonda sabit bir hareketle güncellenmesine dayanmaktadır. Denklemlerdeki c popülasyondan rastgele seçilen bir indeksi, l ise (-2) ile 1 arasında rastgele oluşturulan bir sayıyı ifade etmektedir [18, 22, 24-30].

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \overrightarrow{SW}_c^{t+1} + \mu_2 \times (\vec{L} + \vec{r}_2 \times (\vec{H} - \vec{L})) \quad (6)$$

$$\mu_2 = B \times \cos(2\pi l) \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{1 + e^t} \quad (8)$$

Denklem (4) ve (6), arama alanını keşfetmek ve en umut verici bölgeleri bulmak için birbirlerini tamamlamaktadırlar. Ancak, dişi örümcek arısının bir sonraki pozisyonunu oluşturmak için bir denklem kullanılması gerektiği düşünüldüğünde, acaba bu durumda Denklem (4) mü, yoksa (6) mı kullanılmalıdır? Bu sorunun cevabı ise Denklem (9) kullanılarak rastgele belirlenmiş olur ve denklemdeki r_3 ve r_4 $[0, 1]$ aralığında iki rastgele sayı ifade etmektedir.

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \begin{cases} \text{Denklem (4), eğer } r_3 < r_4 \\ \text{Denklem (6), diğer durumlarda} \end{cases} \quad (9)$$

3.2.2. Takip ve Kaçış Aşaması (Keşif ve Kullanım)

Örümcek arısı avını bulduktan sonra ağın göbeğinde onlara saldırmaya çalışır, ancak örümcekler kaçmak için yere düşerler. Örümcek arısı düşen örümcekleri takip ederek onları felç eder ve önceden hazırlanmış yuvalarına sürükler. Diğer durumlarda örümcek, ağın merkezinden düşen örümceklerin izini kaybeder. Örümcek arısının bu davranışı bir yandan kaçarken bir yandan da örümceği yakalamaya çalıştığı anlamına gelir. Bu davranış biçimi iki eğilimin benzetimini içerir. Birincisi, örümcek arısı örümcekleri tuzağa düşürmek için avlamasıdır. Bu durumda, örümcek arısının avını takip edecek şekilde Denklem (10) uygulanarak konumu güncellenir. İkinci davranış ise mevcut iterasyon sayısı arttıkça aralarındaki mesafeyi artırmak için bir mesafe faktörü tasarlayarak örümcek arılarından kaçmanın benzetimini içerir. Bu nedenle av, örümcek arısından uzak bazı bölgelerde saklanabilir. Matematiksel olarak ifade edilen Denklem (10)'daki ilk eğilim, örümcek arısının örümcekleri yakalamak için yaptığı kovalama işleminin benzetimini içerir. Burada av ile örümcek arıları arasındaki mesafe başlangıçta küçüktür ve örümcek arıları ile avın hızına göre artabilir veya azalabilir. Denklem (10)'daki C , 2 değeri ile başlayıp doğrusal olarak sıfıra düşen örümcek arısının hızını belirlemek için kullanılan bir mesafe kontrol faktörüdür. Eğer $C > 0.5$ ise örümcek arısı avdan daha hızlıdır, ya da $C < 0.5$ ise av örümcek arısından daha hızlıdır demektir. Aşağıdaki denklemlerde a popülasyondan rastgele seçilen bir indeksi, t ve t_{max} sırasıyla mevcut ve maksimum değerlendirmeyi belirtmektedir. $\overrightarrow{r_5}$ ise $[0, 1]$ aralığında rastgele üretilen değerleri temsil eden bir vektörü ve r_6 ise $[0, 1]$ aralığında rastgele üretilen bir sayıyı göstermektedir [18, 22, 24-30].

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \overrightarrow{SW}_i^t + C \times |2 \times \overrightarrow{r_5} \times \overrightarrow{SW}_a^t - \overrightarrow{SW}_i^t| \quad (10)$$

$$C = \left(2 - 2 \times \left(\frac{t}{t_{max}} \right) \times r_6 \right) \quad (11)$$

Bir örümcek, dişi örümcek arısından kaçtığında aralarındaki mesafe giderek artar. Bu aşama başlangıçta kullanımdır (exploitation). Mesafenin artmasıyla birlikte kullanım keşfe dönüşür. Bu davranışın benzetimi Denklem (12)'deki formül kullanılarak yapılır. Denklemde $\overrightarrow{vc}$ normal dağılıma göre (k) ile $(-k)$ değerleri arasında oluşturulan bir vektördür. Dişi örümcek arısı ile örümcek arasındaki mesafeyi kademeli olarak artırmak için k , Denklem (13) kullanılarak üretilir. Bu iki eğilim arasındaki denge, Denklem (14)'te gösterildiği gibi rastgele elde edilir.

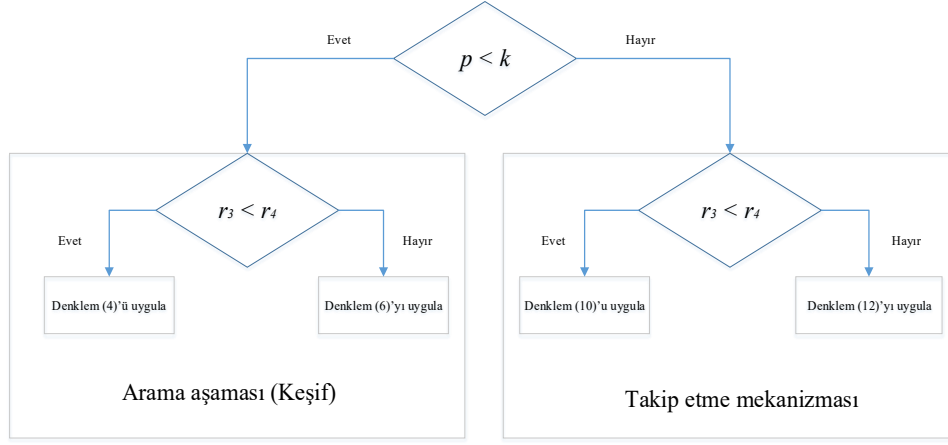
$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \overrightarrow{SW}_i^t \times \overrightarrow{vc} \quad (12)$$

$$k = 1 - \left(\frac{t}{t_{max}} \right) \quad (13)$$

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \begin{cases} \text{Denklem (10), eğer } r_3 < r_4 \\ \text{Denklem (12), diğer durumlarda} \end{cases} \quad (14)$$

Optimizasyon sürecinin başlangıcında, tüm örümcek arıları, optimuma yakın çözümü içerebilecek umut verici bölgeyi bulmak için optimizasyon problemlerinin etki alanını küresel olarak aramak için keşif mekanizmasını uygulayacaktır. Algoritma, yerel minimumda takılıp kalmaktan kaçınmak için iterasyon geçişi sırasında mevcut örümcek arılarının etrafındaki alanları keşfetmek ve kullanmak için takip etme ve kaçma mekanizmasını kullanacaktır. Son olarak, arama aşaması ile takip mekanizması arasındaki değişim aşağıdaki formüle göre ayarlanır. Burada p , $[0, 1]$ arasında rastgele bir sayıdır. Arama aşaması ile takip etme ve kaçış mekanizması arasındaki ilişki, Şekil 2'de gösterilmiştir [18, 22, 24-30]:

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \begin{cases} \text{Denklem (9), eğer } p < k \\ \text{Denklem (14), diğer durumlarda} \end{cases} \quad (15)$$



Şekil 2. Arama aşaması ile takip etme ve kaçış mekanizması arasındaki denge [18].

3.2.3. Yuvalama Davranışı (Kullanım)

Dişi örümcek arısı felçli örümceği önceden hazırlanmış olan yuvaya çeker. Örümcek arısı, toprağı kazmak ve toprakta hücreler oluşturmak, yapraklarda veya kayalarda çamurdan yuvalar yapmak veya örümcek (av) yuvaları veya böcek delikleri gibi önceden var olan yuvaları veya oyukları kullanmak gibi çok sayıda yuvalama davranışına sahiptir. Örümcek arısı çeşitli yuvalanma davranışlarına sahip olduğundan, bu algorithmada söz konusu davranışların iki farklı denklemle benzetimi gerçekleştirilmiştir. Denklem (16), örümceğin en uygun örümceğin bulunduğu bölgeye doğru çekilmesi ve felçli örümceğin yerleştirilip karnının üzerine yumurta bırakılması için yuva yapılabilecek en iyi yer olarak kabul edilmesi esasına dayanır. Bu ilk denklem şu şekilde açıklanmaktadır. Denklemdeki $\overrightarrow{SW}^*$ o ana kadar ki en iyi çözümü temsil eder [18, 22, 24-30].

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \overrightarrow{SW}^* + \cos(2\pi l) \times (\overrightarrow{SW}^* - \overrightarrow{SW}_i^t) \quad (16)$$

Denklem (17) ise, aynı konumda iki yuva yapmaktan kaçınmak için ek bir adım boyutu kullanarak popülasyondan rastgele seçilen bir dişi örümceğin konumu dahilinde yuvayı yapması esasına dayanır. Burada; r_3 , $[0, 1]$ aralığında oluşturulan rastgele bir sayıyı, γ levy uçuşuna göre üretilen bir sayıyı göstermektedir. Denklemdeki a , b ve c popülasyondan rastgele seçilen üç çözümün indislerini ve Denklem (18)'e göre değeri belirlenen $\vec{U}$ ise aynı konumda iki yuva inşa edilmesini önlemek için bir adım boyutunun ne zaman uygulandığını belirlemek için kullanılan ikili bir vektörü ifade etmektedir. Burada $\vec{r}_4$ ve $\vec{r}_5$ $[0, 1]$ aralığındaki rastgele değerleri temsil eden iki vektördür.

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \overrightarrow{SW}_a^t + r_3 \times |\gamma| \times (\overrightarrow{SW}_a^t - \overrightarrow{SW}_i^t) + (1 - r_3) \times \vec{U} \times (\overrightarrow{SW}_b^t - \overrightarrow{SW}_c^t) \quad (17)$$

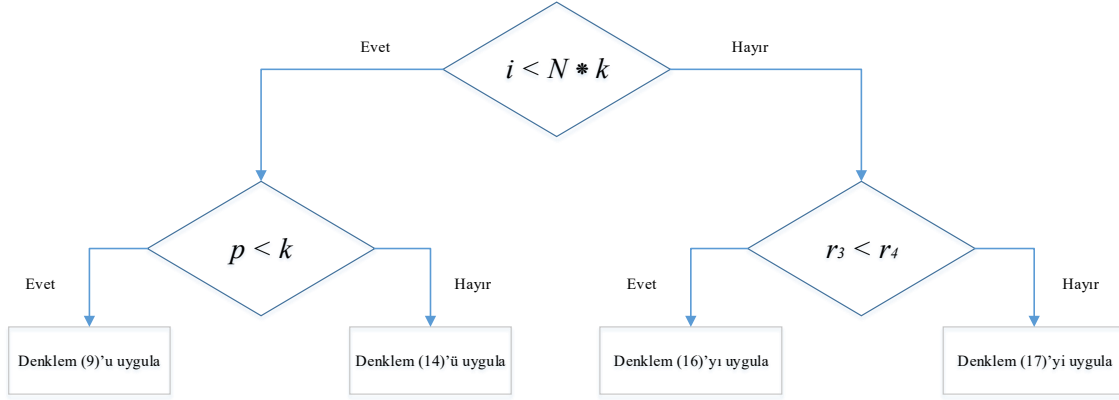
$$\vec{U} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } \vec{r}_5 < \vec{r}_4 \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (18)$$

Algorithmada örümcek arısı yuvalanma davranışlarının Denklem (16) ve (17) gibi iki farklı denklemle benzetimi yapıldığından hangi denklemin kullanılacağı Denklem (19)'la belirlenir.

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \begin{cases} \text{Denklem (16),} & \text{eğer } r_3 < r_4 \\ \text{Denklem (17),} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (19)$$

Son olarak, avlanma ve yuvalama davranışları arasındaki denge, Denklem (20) kullanılarak elde edilir. Algorithmada tüm örümcek arılarının optimizasyon sürecinin başlangıcında ilgili örümceklerini araması Şekil 3'de gösterilmiştir. Sonra, örümcek arıları uygun örümcek arılarını önceden hazırlanmış yuvalara çekecektir [18].

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \begin{cases} \text{Denklem (15),} & \text{eğer } i < N \times k \\ \text{Denklem (19),} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (20)$$



Şekil 3. SWO'da avlanma ve yuvalama davranışlarının akış şeması [18].

3.3. Çiftleşme Davranışı

Örümcek arılarının ana özelliklerinden biri cinsiyet belirleme yetenekleridir. Cinsiyet, yumurtanın bırakıldığı konağın büyüklüğüne göre belirlenir. Şekil 1.c'den görüleceği üzere erkekler küçük örümcek arısı ile temsil edilirken, dişiler büyük örümcek arısı ile temsil edilmektedir. Algoritmada, her örümcek arısı mevcut nesildeki olası bir çözümü ve örümcek arısı yumurtası da o nesildeki yeni üretilen potansiyel çözümü temsil eder. Yeni çözümler (örümcek arısı yumurtaları) aşağıdaki denkleme göre üretilir [18, 22, 24-30].

$$SW_i^{t+1} = Crossover(SW_i^t, SW_m^t, CR) \quad (21)$$

Burada; *Crossover*, SW_i^t ve SW_m^t çözümleri arasında çaprazlama oranı (*CR*- Crossover Rate) olarak bilinen bir olasılıkla uygulanan tek biçimli çaprazlama operatörünü belirtir; SW_m^t ve SW_i^t sırasıyla erkek ve dişi örümcek arısı temsil eden iki vektördür. Algoritmada erkek örümcek arısı, dişi örümcek arısından farklı olacak şekilde Denklem (22) kullanılarak oluşturulur.

$$\overrightarrow{SW}_i^{t+1} = \overrightarrow{SW}_i^t + e^l \times |\beta| \times \overrightarrow{v}_1 + (1 - e^l) \times |\beta_1| \times \overrightarrow{v}_2 \quad (22)$$

Burada; β ve β_1 normal dağılıma göre rastgele oluşturulmuş iki sayıyı ve e ise üstel sabiti göstermektedir. Denklemdaki $\overrightarrow{v}_1$ ve $\overrightarrow{v}_2$ vektörleri aşağıda verilen eşitliklere göre üretilir.

$$\overrightarrow{v}_1 = \begin{cases} (\overrightarrow{x}_a - \overrightarrow{x}_i), & \text{eğer } f(\overrightarrow{x}_a) < f(\overrightarrow{x}_i) \\ (\overrightarrow{x}_i - \overrightarrow{x}_a), & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (23)$$

$$\overrightarrow{v}_2 = \begin{cases} (\overrightarrow{x}_b - \overrightarrow{x}_c), & \text{eğer } f(\overrightarrow{x}_b) < f(\overrightarrow{x}_c) \\ (\overrightarrow{x}_c - \overrightarrow{x}_b), & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (24)$$

Denklemlerde a , b ve c , $a \neq i \neq b \neq c$ olacak şekilde popülasyondan rastgele seçilen üç çözümün indekslerini ifade etmektedir. Çaprazlama ise iki ebeveynli örümcek arısı içindeki genetik materyali yeniden birleştirerek ebeveynlerinin özelliklerini paylaşan bir yavru (yumurta) üretmek için kullanılır. Avlanma ve çiftleşme davranışları arasındaki değiş tokuş, önceden tanımlanmış bir faktör olan değiş tokuş oranına (*TR*-Tradeoff Rate) dayanmaktadır.

3.4. Popülasyon Azaltma ve Bellek Tasarrufu

Dişi örümcek, konağın karnına yumurta bıraktıktan sonra yuvayı kapatır ve yuva alanını göze çarpmayan bir şekilde bırakır. Bu durum, dişi örümceğin optimizasyon sürecindeki rolünün neredeyse tamamlandığını ve optimizasyon sürecinin geri kalanında fonksiyon değerlendirmelerini diğer örümcek arılarına devretmenin daha iyi sonuçlara ulaşmaya yardımcı olabileceği anlamına gelmektedir. İterasyon sırasında, popülasyondaki bazı örümcek arıları, diğer örümcek arılarına daha fazla fonksiyon değerlendirmesi sağlamak için sonlandırılırken, aynı zamanda popülasyon çeşitliliğini azaltarak yakınsama hızını optimum çözüme yakın bir çözüme doğru hızlandıracaktır. Bu nedenle tüm fonksiyon değerlendirmelerinin her değerlendirmesinde, yeni popülasyonun uzunluğu denklem (25) kullanılarak güncellenir [18, 22, 24-30].

$$N = N_{min} + (N - N_{min}) \times k \quad (25)$$

Burada N_{min} optimizasyon sürecinin farklı aşamalarında yerel minimumlara takılıp kalmamak için kullanılan minimum nüfus sayısını göstermektedir. Algoritmada, her bir örümcek arısı tarafından elde edilen en iyi örümcek konumunu bir sonraki nesilde güncellenmesi için bellek tasarrufu gerçekleştirilir. Kısaca her bir örümcek arısı tarafından elde edilen her bir çözüm, bir önceki

nesildeki eşdeğeri ile karşılaştırılır ve mevcut çözüm daha uygun ise yenisi ile değiştirilir. SWO algoritmasının sözde kodu Algoritma 1’de verilmiştir [18, 26].

Algoritma 1. SWO Algoritmasının sözde kodu [18, 26]

Input: $N, N_{min}, CR, TR, t_{max}$

Output: $\overrightarrow{SW}^*$

Denklem (3)’ü kullanarak N dişi örümcek arısını başlatma. $\overrightarrow{SW}_i (i = 1, 2, \dots, N)$

Her $\overrightarrow{SW}_i$ değerini değerlendirme ve $\overrightarrow{SW}^*$ içinde en iyi uygunluk değere sahip olan değeri bulma

$t=1$; // mevcut fonksiyonu değerlendirme

while($t < t_{max}$)

r_6 : 0 ile 1 arasında rastgele değerler üretme

if ($r_6 < TR$) %% Avlanma ve Yuvalama davranışı

for $i=1:N$

Şekil 4.’ü uygulama

$f(\overrightarrow{SW}_i)$ değerini hesaplama

$t=t+1$

End for

Else %% Çiftleşme davranışı

for $i=1:N$

Denklem (21)’i uygulama

$t=t+1$

End for

End if

Memory Saving uygulama

Denklem (25)’i kullanarak N değerlerini güncelleme

End while

4. SWO Algoritmasının Sonuçlarını Karşılaştırmak üzere Seçilen Diğer Algoritmalar

Bu bölümde SWO algoritması uygulanarak elde edilen sonuçları karşılaştırmak için kullanılan HHO, CSS ve BSA algoritmaları kısaca özetlenmiştir.

4.1. Harris Şahin Optimizasyonu (HHO) Algoritması

Bu algoritma, doğada iyi bilinen bir yırtıcı kuş olan Harris şahinlerinin avlanma stratejisi benzetimi yapılarak oluşturulmuştur [19]. Harris şahini, diğer yırtıcı kuşlardan farklı olarak genellikle aile üyeleriyle birlikte bir avı keşfetmek ve yakalamak için saldırırlar. Bu kuş, potansiyel avı izleme, çevreleme, temizleme ve sonunda saldırma konusunda evrimleşmiş yenilikçi takım kovalama yetenekleri gösterir. Bu akıllı kuşlar, üreme dışı mevsimde birkaç bireyden oluşan akşam yemeği partileri düzenleyebilir. Yırtıcı kuşlar aleminde gerçek anlamda işbirlikçi avcılar olarak bilinirler. Harris şahinleri avlanma süreçlerinde özellikle tavşan avlama sürecinde sürü olarak hareket eder. Sürünün bir lideri (en iyi şahin) bulunur ve lider ve sürünün diğer üyeleri öncelikle keşif uçuşları yaparlar. Harris şahinleri, koşulların dinamik doğasına ve bir avın kaçış modellerine bağlı olarak çeşitli kovalama stratejileri gösterebilirler. Bir değiştirme taktiği, lider şahin avın üzerine eğilip kaybolduğunda ve kovalamaca parti üyelerinden biri tarafından sürdürüldüğünde gerçekleşir. Bu durum kaçan tavşanı şaşırtır, tavşanı yorar ve onun savunmasızlığını artırır. Son olarak, genellikle en güçlü ve deneyimli olan şahinlerden biri yorgun tavşanı zahmetsizce yakalayıp diğer parti üyeleriyle paylaşır. Harris şahinlerinin bu özellikleri Heidari ve arkadaşları tarafından 2019 yılında Harris şahinleri optimizasyonu (Harris hawks optimization, HHO) algoritması olarak modellenmiştir [19]. HHO popülasyon temelli bir optimizasyon tekniği olup keşif, keşiften saldırıya geçiş ve saldırı aşamalarından oluşur. HHO’da keşif aşamasında iki farklı strateji olarak uygulanır. Keşiften saldırıya geçiş aşamasında, avın kaçma sırasında enerjisinin azalacağı için Harris şahinleri farklı saldırı davranışları arasında geçişler yapabilirler. Bu nedenle saldırı aşaması algoritmada yumuşak, sert, kademeli hızlı dalışlarla yumuşak ve kademeli hızlı dalışlarla sert kuşatma olmak üzere dört farklı strateji olarak modellenmiştir. HHO algoritmasının sözde kodu Algoritma 2’de verilmiştir [19].

Algoritma 2. HHO Algoritmasının sözde kodu [19]**Inputs:** N popülasyon büyüklüğü ve maksimum iterasyon sayısı T .**Outputs:** Tavşanın konumu ve tavşanın *fitness* değeri.Rastgele bir popülasyonu başlat. $X_i(i=1,2,...,N)$.**while** (durdurma kriteri sağlanmadıysa) **do** Şahinlerin *fitness* değerlerini hesapla. X_{rabbit} tavşanın konumunu ayarla (en iyi konum olarak).**for** (her şahin (X_i)) **do** Başlangıç enerjisi E_0 , sıçrama gücü J ve E değerini güncelle. **if** ($|E| \geq 1$) **then** Keşif Aşamasındaki Konum vektörünü güncelle. **if** ($|E| < 1$) **then** (Sömürü Aşaması) **if** ($r \geq 0.5$ ve $|E| \geq 0.5$) **then** Yumuşak Kuşatma Konum vektörünü güncelle. **else if** ($r \geq 0.5$ ve $|E| < 0.5$) **then** Sıkı Kuşatma Konum vektörünü güncelle. **else if** ($r < 0.5$ ve $|E| \geq 0.5$) **then** İlerleyici Hızlı Dalmalarla Yumuşak Kuşatma Konum vektörünü güncelle. **else if** ($r < 0.5$ ve $|E| < 0.5$) **then** İlerleyici Hızlı Dalmalarla Sıkı Kuşatma Konum vektörünü güncelle.**Return** X_{rabbit} **4.2. CSS Algoritması**

Yüklü Sistem Arama (CSS) algoritması, Kaveh ve Talatahari tarafından geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. Algoritmanın temeli, Newton'un hareket yasaları ile elektrik fiziğindeki Coulomb ve Gauss yasalarına dayanır. Bu algortmada, her bir ajan (çözüm adayı), elektrik yüklü bir parçacık (Charged Particle - CP) olarak ele alınır. Her bir CP, Coulomb ve Gauss yasalarına uygun şekilde diğer yüklü parçacıklar üzerine elektriksel kuvvet uygular ve bu, yüklü bir küre şeklinde modellenir. Bu kuvvetin büyüklüğü, küre içindeki CP için CP'ler arasındaki mesafeyle orantılıyken, kürenin dışında bulunan bir CP için parçacıklar arasındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır ve bu kuvvetler çekici veya itici olarak ortaya çıkabilir. Arama alanındaki CP'lerin başlangıç konumları rastgele belirlenir. Genellikle çekici olarak çıkan kuvvet, CP'leri arama alanı içinde belirli bir alanda toplarken, itici kuvvet CP'leri dağıtmaya çalışır. Sonuç kuvvetleri ve hareket yasaları, CP'lerin yeni konumlarını belirler. Bu kurala göre, her CP, sonuç kuvvetleri ve önceki hızıyla yeni konumuna doğru hareket eder Algoritma bu şekilde optimizasyon sürecinin ilerlemesini sağlar. Her CP, CP arama alanından çıkarsa, konumu, uyum aramasına dayalı elleçleme yaklaşımıyla düzeltilir. Ayrıca, en iyi sonuçları kaydetmek için yüklü bellek kullanılır. CSS algoritmasının geliştirilmesi aşağıda kısaca özetlenen 8 kural üzerinden gerçekleştirilmiştir. CSS algoritmasının bu kurallar çerçevesinde sözde kodu ise Algoritma 3'te verilmiştir [20].

Kural 1: CSS bir dizi yüklü parçacığı (CP) dikkate alır ve her bir CP'nin bir yük büyüklüğü olup uzayı etrafında bir elektrik alanını oluşturur.

Kural 2: CP'lerin başlangıç konumları arama uzayında rastgele belirlenir.

Kural 3: Çekici kuvvetler einsinden bakıldığında, herhangi bir CP başka biri CP'yi etkileyebilir, yani kötü bir CP iyi bir CP'yi etkileyebilir veya bunun tersi de geçerlidir. İyi bir CP kötü bir CP'yi de çekebilir.

Kural 4: Bir CP üzerinde etkili olan sonuç elektrik kuvvetinin değeri, ajanların birbirinden uzak olduğu ilk iterasyonda, bir CP üzerinde etkili olan sonuç kuvvetinin büyüklüğü, parçacıklar arasındaki ayrımın karesiyle ters orantılıdır. Fakat CP'lerin küçük bir alanda toplandığı ve CP'ler arasındaki ayrımın küçük olduğu durumlarda ise ayrım mesafesinin karesiyle ters orantılı olmak yerine parçacıkların ayrım mesafesiyle orantılı hale gelir.

Kural 5: Her bir CP'nin yeni konumu ve hızı her iterasyonda güncellenir.

Kural 6: Hesaplama maliyetini artırmadan algoritma performansını iyileştirebilmek için en iyi CP vektörlerini ve ilgili amaç fonksiyon değerlerini kayıt altına alabilen bir yüklü bellek (Charged Memory, CM) kullanılmalıdır.

Kural 7: Birçok meta-sezgisel algortmada olduğu gibi CSS'de de iki büyük sorun vardır. Bu sorunlardan birincisi aramanın başında, sırasında ve sonunda keşif ve kullanım (exploitation) arasındaki denge ve ikincisi ise değişkenlerin sınırlarını ihlal eden bir etkenle nasıl başa çıkılacağı konusudur. İlk sorun, yukarıda belirtilen kuralların uygulanmasıyla doğal olarak çözülür, ancak ikinci sorunu çözmek için en basit yaklaşımlardan biri, ihlal edilen değişken için en yakın sınır değerlerini kullanmaktır. İhlali gerçekleştiren parçacığı önceki konumuna geri döndürmek bazen zor olabilir, alternatif olarak bu durumda değişken sınırlarını ihlal eden çözüm vektörünün herhangi bir bileşeni CM'den yeniden üretilebilir.

Kural 8: Algoritmayı sonlandırma kriterleri olarak maksimum yineleme sayısı, iyileştirme olmayan yineleme sayısı, minimum amaç fonksiyonu hatası ve son olarak en iyi ve en kötü CP'ler arasındaki fark işlemlerinden birisi kullanılır.

Algoritma 3. CSS Algoritmasının sözde kodu [20]

Seviye 1: Başlatma• **Adım 1:** *Başlatma.*

CSS algoritma parametrelerini başlatın; Rastgele konumlara ve ilişkili hızlara sahip Yüklü Parçacıklar dizisini başlatın (Kural 1 ve 2).

• **Adım 2:** *CP sıralaması.*

CP'ler için uygunluk fonksiyonunun değerlerini değerlendirin, birbirleriyle karşılaştırın ve artan şekilde sıralayın.

• **Adım 3:** *CM oluşturma.*

CM'deki ilk CP'lerin CMS numarasını ve hedef fonksiyonunun ilişkili değerlerini saklayın.

Seviye 2: Arama• **Adım 1:** *Çekim kuvveti belirleme.*

Her bir CP'yi diğerlerine doğru hareket ettirme olasılığını belirleyin (Kural 3) ve her CP için çekim kuvveti vektörünü hesaplayın (Kural 4).

• **Adım 2:** *Çözüm oluşturma.*

Her bir CP'yi yeni konuma taşıyın ve hızları bulun (Kural 5).

• **Adım 3:** *CP konum düzeltmesi.*

Her CP izin verilen arama alanından çıkarsa, Kural 7'yi kullanarak konumunu düzeltin.

• **Adım 4:** *CP sıralaması.*

Yeni CP'ler için hedef fonksiyonunun değerlerini değerlendirin ve karşılaştırın ve bunları artan şekilde sıralayın.

• **Adım 5:** *CM güncellemesi.*

Bazı yeni CP vektörleri CM'deki en kötü vektörlerden daha iyiye, daha iyi vektörleri CM'ye dahil edin ve en kötü olanları CM'den çıkarın (Kural 6).

Seviye 3: Sonlandırma kriteri kontrolü

• Sonlandırma kriteri karşılanana kadar arama seviyesi adımlarını tekrarlayın (Kural 8).

4.3. BSA Algoritması

BSA algoritması, optimizasyon problemlerinde yerel çözümlerden sıyrarak küresel çözümler bulmayı hedefler. Algoritmanın işleyişi, başlangıç değerlerinin atanması, ilk seçim aşaması, mutasyon, çaprazlama ve son seçim aşaması gibi beş ana adıma dayanmaktadır. İlk değer verilmesi aşamasında popülasyon büyüklüğü, problemin boyutu, popülasyon içerisindeki bir hedef birey ve son olarak da çözüm uzayındaki en alt ve en üst sınır değerleri belirlenir. Birinci seçim aşamasında arama yönünü hesaplamak için algoritmanın tarihsel popülasyonu belirlenir. Böylece, BSA algoritması geçmişte elde edilen değerleri, bir sonraki karar alma mekanizmasında kullanılmak üzere hafızaya alır. Tarihsel popülasyonunun belirlenmesiyle birlikte popülasyon üyeleri rastgele olarak yeniden sıralanır. Mutasyon aşamasında, mutant popülasyonunun ilk değerleri hesaplanır. Çaprazlama aşamasında, popülasyonun son durumu değerlendirmeye alınır. Bu aşamada, optimizasyon problemine göre yüksek performans gösteren popülasyon üyeleri, hedef popülasyon bireylerini belirlemek amacıyla seçilir. BSA algoritması ayrıca, mutasyon geçiren bireylerin çözüm uzayının dışına çıkmasını önlemek için bir sınırlandırma mekanizması kullanır. İkinci seçim aşamasında, popülasyon güncellenir ve en iyi birey seçilir. Her iterasyon döngüsünde, mevcut küresel en iyi değer tüm popülasyon bireyleriyle karşılaştırılır. Eğer herhangi bir bireyin amaç fonksiyonu değeri, mevcut küresel en iyiden daha üstünse, yeni küresel en iyi değer bu bireyin bulunduğu konum olur. BSA algoritmasının sözde kodu Algoritma 4'de verilmiştir [21].

Algoritma 4. BSA Algoritmasının sözde kodu [21]

Input: *ObjFun, N, D, maxcycle, mixrate, low_{1:D}, up_{1:D}*

Output: *globalminimum, globalminimizer*

// $rnd \sim U(0,1)$, $rndn \sim N(0,1)$, $w=rndint(\cdot)$, $rndint(\cdot) \sim U(1,\cdot) \mid w \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$

function bsa(ObjFun, N, D, maxcycle, low, up)

// BAŞLANGIÇ

globalminimum=inf

for *i* **from** 1 **to** *N* **do**

for *j* **from** 1 **to** *D* **do**

$P_{i,j}=rnd(up_j-low_j)+low_j$ // Popülasyonun başlatılması, P.

$oldP_{i,j}=rnd(up_j-low_j)+low_j$ // oldP'nin başlatılması, oldP.

end

$fitnessP_i=ObjFun(P_i)$ // P'nin ilk uygunluk değerleri.

end

for *iteration* **from** 1 **to** *maxcycle* **do**

 // SEÇİM-I

if ($a < b \mid a, b \sim U(0,1)$) **then** $oldP:=P$ **end**

$oldP:=permuting(oldP)$ // 'etkileme'; oldP içindeki iki bireyin pozisyonlarını rasgele değiştirme.

 Deneme Popülasyonunun Oluşturulması

 // MUTASYON

$mutant=P+3 \cdot rndn \cdot (oldP-P)$

```

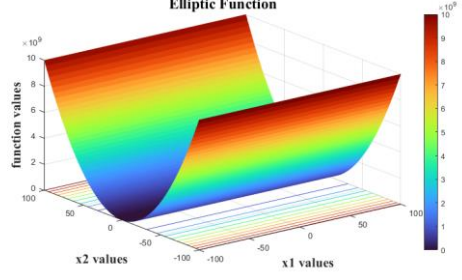
// ÇAPRAZLAMA
map1:N, 1:D=1 // Başlangıç haritası birlerden oluşan N x D matrisidir.
if ( $c < d$  |  $c, d \sim U(0,1)$ ) then
    for  $i$  from 1 to  $N$  do
        map $i, u(1:\{mixrate \cdot rnd \cdot D\})$  = 0 |  $u = \text{permuting}(1,2,3,\dots,D)$ 
    end
else
    for  $i$  from 1 to  $N$  do, map $i, randi(D)$ =0, end
end
// Deneme Popülasyonu Üretimi, T
T:=mutant
for  $i$  from 1 to  $N$  do
    for  $j$  from 1 to  $D$  do
        if map $i, j$ =1 then T $i, j$ :=P $i, j$ 
    end
end
// Sınır Kontrol Mekanizması
for  $i$  from 1 to  $N$  do
    for  $j$  from 1 to  $D$  do
        if (T $i, j$ <low $j$ ) or (T $i, j$ >up $j$ ) then
            T $i, j$ =rnd·(up $j$ -low $j$ )+low $j$ 
        end
    end
end
end
// Seçim-II
fitnessT=ObjFun(T)
for  $i$  from 1 to  $N$  do
    if fitnessT $i$ <fitnessP $i$  then
        fitnessP $i$ :=fitnessT $i$ 
        P $i$ =T $i$ 
    end
end
fitnessPbest=min(fitnessP) | best  $\in \{1,2,3,\dots,N\}$ 
if fitnessPbest<globalminimum then
    globalminimum:=fitnessPbest
    globalminimizer:=Pbest
    // Global minimum ve global minimizer dışarı aktarılır.
end
end

```

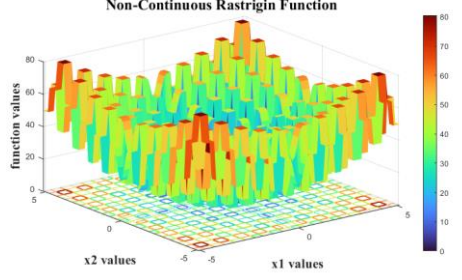
5. Test Fonksiyonları

Bu çalışmada test fonksiyonu olarak değişken boyutlu fonksiyonlar kapsamında f_1 fonksiyonu unimodal (Elliptic Fonksiyon), f_2 - f_7 arası fonksiyonlar multimodal (Non-Continuous Rastrigin, Alpine, Levy, Weierstrass, Michalewicz, Dixon&Price Fonksiyonları) ve sabit boyutlu fonksiyonlar kapsamında ise f_8 - f_{10} arası fonksiyonlar (Schaffer, Himmelblau ve Kowalik Fonksiyonları) olmak üzere 10 adet test fonksiyonu seçilmiştir. Seçilen fonksiyonların grafikleri, temel özellikleri ve eşitlikleri aşağıdaki gibi Şekil 4-13 arasında gösterilmiştir [1, 31, 32].

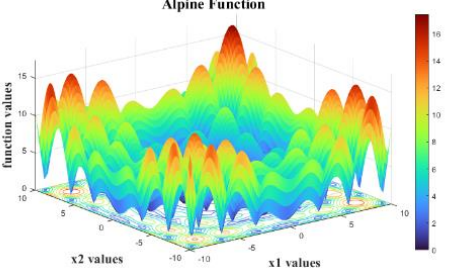
Bu çalışmada kullanılan test fonksiyonları, meta-sezgisel algoritmaların performanslarını farklı problem türlerinde değerlendirebilmek için yaygın olarak tercih edilen standart matematiksel fonksiyonlardır. f_1 - f_7 arası fonksiyonlar yüksek boyutlu (30, 50 ve 100) değişken boyutlu fonksiyonlardır ve optimizasyon algoritmalarının hem küresel arama (exploration) hem de yerel arama (exploitation) kabiliyetlerini test etmek için uygundur. f_8 - f_{10} arası fonksiyonlar ise sabit boyutlu fonksiyonlardır ve genellikle parametrik karmaşıklıkların az olduğu ortamlarda algoritmaların doğruluğunu ve hassasiyetini değerlendirmek için kullanılır. Her bir fonksiyonun minimum değeri, arama alanı ve boyut bilgisi tablolar ve grafiklerle birlikte aşağıda sunulmuştur. Ayrıca her fonksiyonun optimizasyon probleminde karşılık geldiği zorluk türleri de (örneğin: çoklu yerel minimum, süreksizlik, vs.) belirtilmiştir.

Fonksiyon Adı	Elliptic Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	30, 50, 100	
Aralık Değerleri	$(-100,100)^n$	
Yapısı	Tek modlu Ayrılamaz Sürekli Dışbükey	
$f_1(x) = \sum_{i=1}^d (10^6)^{\frac{i-1}{d-1}} \times x_i^2$		

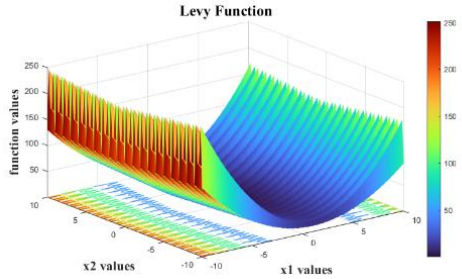
Şekil 4. *f1* fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Non-Continuous Rastrigin Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	30, 50, 100	
Aralık Değerleri	$(-5.12,5.12)^n$	
Yapısı	Sürekli Dışbükey Çok modlu Türevlenebilir Ayrılabılır	
$f_2(x) = \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10], \quad x_i = \begin{cases} \text{eğer } x_i \leq 0.5 & \text{ise } x_i \\ \text{eğer } x_i > 0.5 & \text{ise } \text{round}(2 \cdot x_i)/2 \end{cases}$		

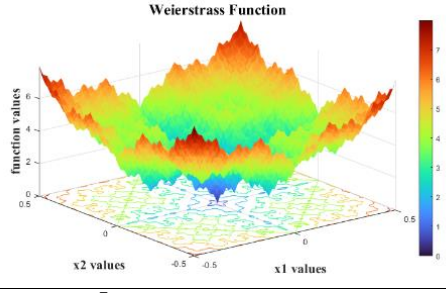
Şekil 5. *f2* fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Alpine Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	30, 50, 100	
Aralık Değerleri	$(-10,10)^n$	
Yapısı	Dışbükey değildir Ayrılamaz Türevlenebilir	
$f_3(x) = \sum_{i=1}^d x_i \sin(x_i) + 0.1x_i $		

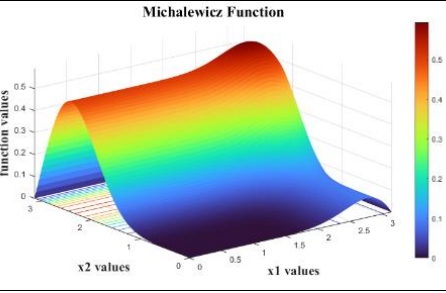
Şekil 6. *f3* fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Levy Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	30, 50, 100	
Aralık Değerleri	$(-10,10)^n$	
Yapısı	Sürekli Dışbükey değildir Çok modludur Ayrılamaz Türevlenebilir	
$f_4(x) = \sin^2(\pi w_1) + \sum_{i=1}^{d-1} (w_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi w_i + 1)] + (w_d - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi w_d)], \quad w_i = 1 + \frac{x_i - 1}{4}$		

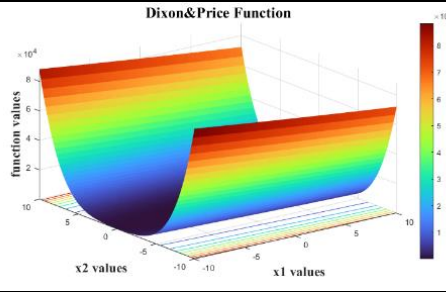
Şekil 7. *f4* fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Weierstrass Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	30, 50, 100	
Aralık Değerleri	$(-0.5, 0.5)^n$	
Yapısı	Süreklidir Çok modludur Ayrılmaz Türevlenebilir	
$f_5(x) = \sum_{i=1}^d \left[\sum_{k=0}^{k_{max}} a^k \cos(2\pi b^k (x_i + 0.5)) \right] - d \left[\sum_{k=0}^{k_{max}} a^k \cos(2\pi b^k) \right], a = 0.5, b = 3, k_{max} = 20$		

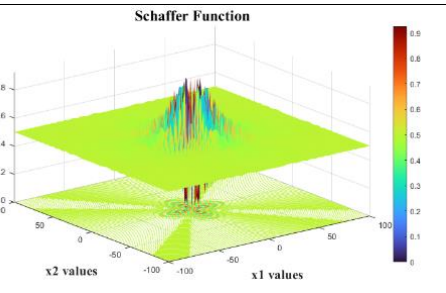
Şekil 8. f_5 fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Michalewicz Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	30, 50, 100	
Aralık Değerleri	$(0, \pi)^n$	
Yapısı	Süreklidir Çok modludur Türevlenebilir Konveks değildir	
$f_6(x) = - \sum_{i=1}^d \sin(x_i) \cdot \left(\sin\left(\frac{i \cdot x_i^2}{\pi}\right) \right)^{2m}, m = 10$		

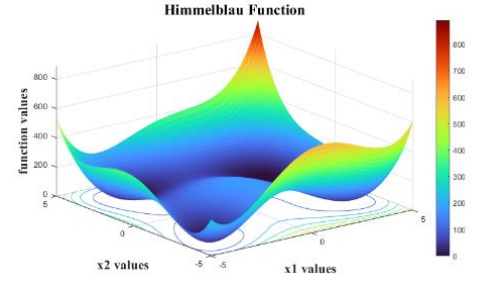
Şekil 9. f_6 fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Dixon&Price Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	30,50,100	
Aralık Değerleri	$(-10, 10)^n$	
Yapısı	Süreklidir Türevlenebilir Konveks değildir	
$f_7(x) = (x_1 - 1)^2 + \sum_{i=2}^d i \cdot (2x_i^2 - x_{i-1})^2$		

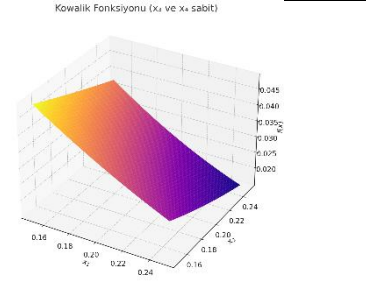
Şekil 10. f_7 fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Schaffer Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	2	
Aralık Değerleri	$(-100, 100)^n$	
Yapısı	Süreklidir Türevlenebilir Dışbükey değildir Tek modludur Ayrılmaz	
$f_8(x, y) = 0.5 + \frac{\sin^2(x^2 + y^2)^2 - 0.5}{1 + 0.001(x^2 + y^2)^2}$		

Şekil 11. f_8 fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Himmelblau Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	0	
Boyut Sayısı	2	
Aralık Değerleri	$(-5,5)^n$	
Yapısı	Süreklidir Türevlenebilir Dışbükey değildir	
$f_9(x,y) = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2$		

Şekil 12. f_9 fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

Fonksiyon Adı	Kowalik Function	
(<i>fmin</i>) Değeri	≈ 0.0003075	
Boyut Sayısı	4	
Aralık Değerleri	$(-5,5)^n$	
Yapısı	Süreklidir Türevlenebilir Konveks değildir	
$f_{10}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{k=1}^{11} \left[a_k - \frac{x_1 b_k (b_k + x_2)}{b_k (b_k + x_3) + x_4} \right]^2$ $a=[0.1957, 0.1947, 0.1735, 0.16, 0.0844, 0.627, 0.456, 0.342, 0.323, 0.235, 0.246]$ $b=[0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16]$		

Şekil 13. f_{10} fonksiyonuna ait özellikler ve 3-D arama uzayı.

6. Sayısal Sonuçlar

Bu çalışmada yer alan test fonksiyonlarının SWO ile çözümünde elde edilen sonuçlarını karşılaştırmak için HHO, CSS ve BSA algoritmaları kullanılmıştır. Algoritmaların performans, yakınsama, kararlılık ve hız açısından değerlendirilmesi için test fonksiyonlarının sonuçlarının değerlendirilmesi, test fonksiyonlarının boyutlarına göre 30, 50, 100 ve sabit boyutlu olmak üzere dört alt başlık altında ayrı ayrı yapılmıştır.

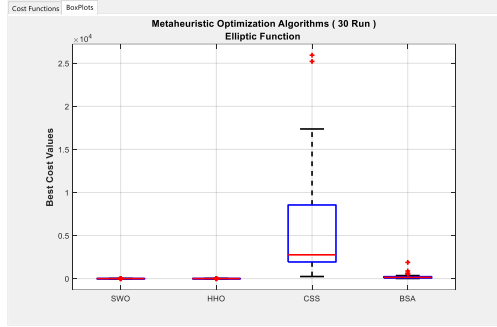
SWO algoritmasının performansını en üst düzeye çıkarmak için etkili bir şekilde tahmin edilmesi gereken minimum popülasyon büyüklüğü olan N_{min} , değiş-tokuş oranı olan TR ve çaprazlama oranı CR olan üç adet parametresi vardır. Yapılan çalışmalar sonucunda bu parametrelerin en iyi değerlerinin, TR için 0,3, CR için 0,2 ve N_{min} için ise 20 olduğu sonucuna varılmıştır [18]. Çalışmada iterasyon sayısı olarak tüm algoritmalar ve tüm test fonksiyonları için 500 (15000 fonksiyon çağırımı, FCall) alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan tüm algoritmalar için kullanılan parametre değerleri Tablo 1’de birlikte verilmiştir. Algoritmaların test fonksiyonlarına uygulanması için Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU@2.30GHz işlemcili ve 6 GB RAM bellekli iş istasyonu kullanılarak MATLAB R2024a’da program geliştirilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan algoritmalarla ait parametreler

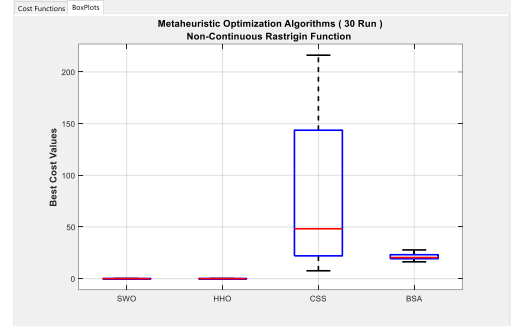
Algoritmalar	Parametreler			İterasyon sayısı	PopN	FCall
SWO	TR	CR	N_{min}	500	40	15000
	0,3	0,2	20			
HHO	E	J				
	[0,2]	[0,2]				
BSA	mixrate					
	2					
CSS	r	Start k_v	Finish k_v			
	0,01	0,5	0,3			
	Start k_a	Finish k_a				
	0,5	0,5				

6.1. Boyutu 30 Olan Test Fonksiyonları için elde edilen sonuçlar

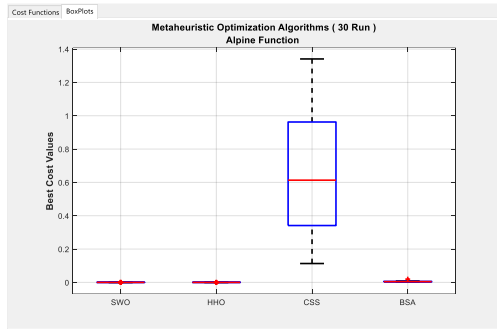
Bu bölümde 30 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonları SWO, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 14-20 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 22-28 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmalarla göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 2'de verilmiştir.



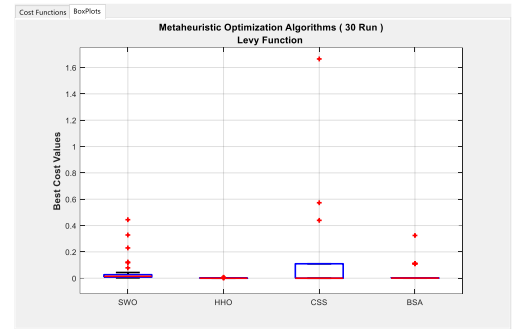
Şekil 14. f1 için kutu grafiği (30-D)



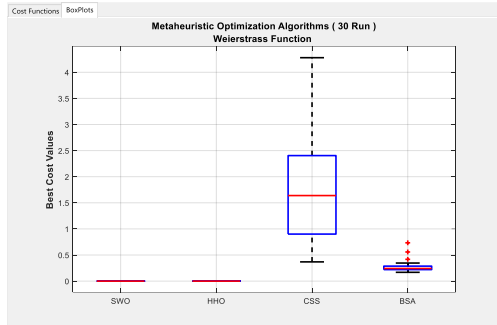
Şekil 15. f2 için kutu grafiği (30-D)



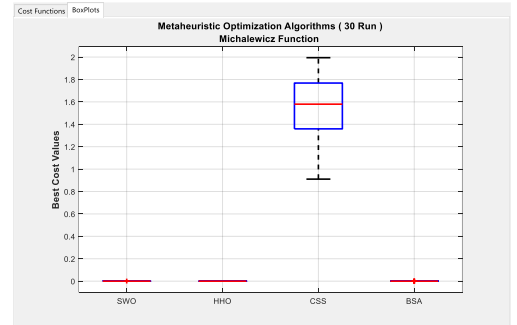
Şekil 16. f3 için kutu grafiği (30-D)



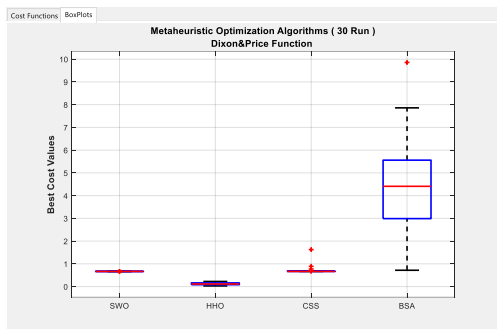
Şekil 17. f4 için kutu grafiği (30-D)



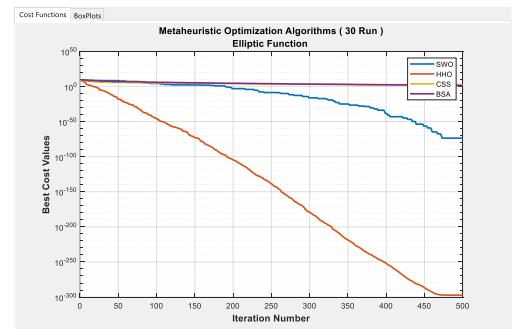
Şekil 18. f5 için kutu grafiği (30-D)



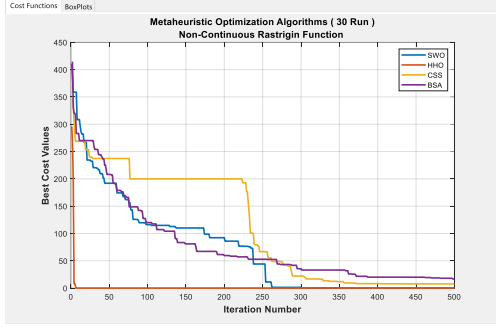
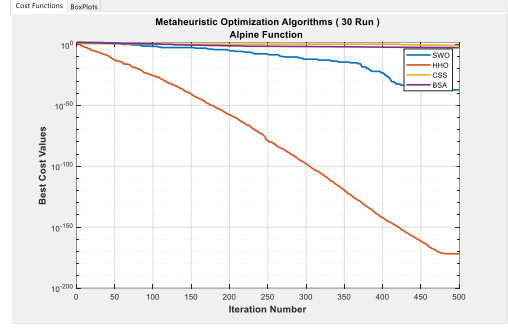
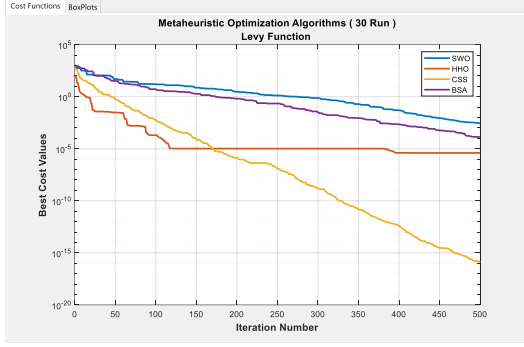
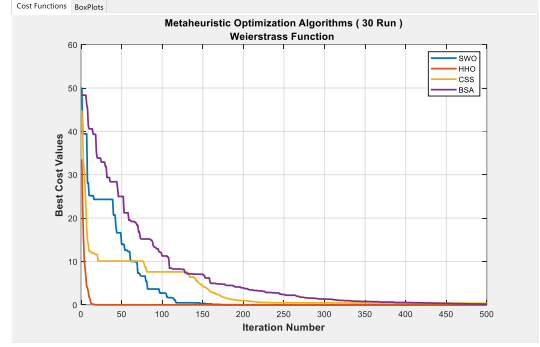
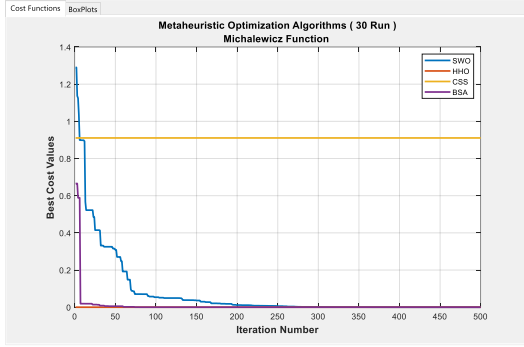
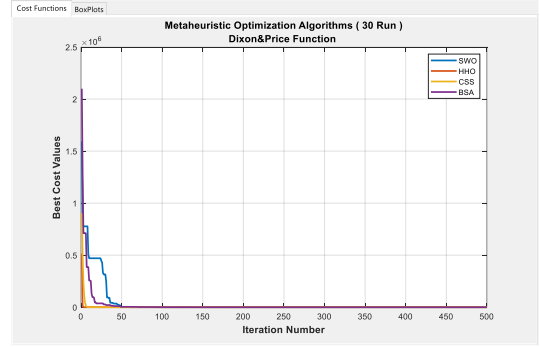
Şekil 19. f6 için kutu grafiği (30-D)



Şekil 20. f7 için kutu grafiği (30-D)



Şekil 21. f1 için yakınsama eğrileri (30-D)

Şekil 22. f_2 için yakınsama eğrileri (30-D)Şekil 23. f_3 için yakınsama eğrileri (30-D)Şekil 24. f_4 için yakınsama eğrileri (30-D)Şekil 25. f_5 için yakınsama eğrileri (30-D)Şekil 26. f_6 için yakınsama eğrileri (30-D)Şekil 27. f_7 için yakınsama eğrileri (30-D)

Şekil 14-27 arası gösterilen 30 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz. f_1 ve f_2 test fonksiyonları için Şekil 14-15'de SWO ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 21-22'de ise HHO'nun SWO'ya göre daha hızlı bir şekilde yakınsadığı görülmektedir. f_3 test fonksiyonu için Şekil 16'da SWO, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 23'te ise HHO'nun SWO'ya göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. f_4 test fonksiyonu için Şekil 17'de HHO algoritmasının en iyi dağılıma sahip olduğu ve Şekil 24'te ise CSS algoritmasının HHO ve SWO'ya göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. f_5 test fonksiyonu için Şekil 18'de SWO ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 25'de ise HHO algoritmasının SWO ile birlikte iyi yakınsadıkları görülmektedir. f_6 test fonksiyonu için Şekil 19'da SWO, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 26'da ise HHO algoritmasının SWO'ya göre en az iterasyonla yakınsadığı söylenebilir. f_7 test fonksiyonu için Şekil 20'de SWO, HHO ve CSS algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 27'de ise HHO algoritmasının SWO'ya göre daha hızlı yakınsadığı ifade edilebilir.

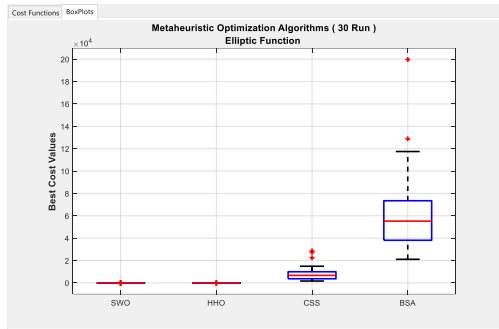
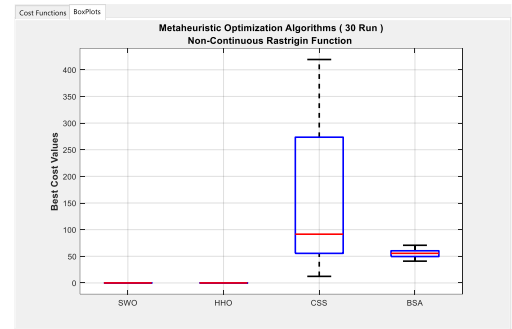
Tablo 2 incelendiğinde ise SWO algoritmasının f_2 ve f_3 'de en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonlarda ise HHO ve CSS algoritmalarının en iyi değerleri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından da SWO algoritmasının en iyi sürede f_1 , f_3 , f_5 , ve f_6 'da olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durumlar olan f_1 , f_3 , f_6 ve f_7 'de ortalama değerler açısından karşılaştırıldığında SWO algoritmasından daha iyi olduğu ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise f_7 hariç SWO algoritmasından daha iyi olduğu görülmektedir. CSS algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum olan f_4 'de ortalama değerler ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, SWO algoritmasından daha kötü değerlere sahip olduğu görülmektedir.

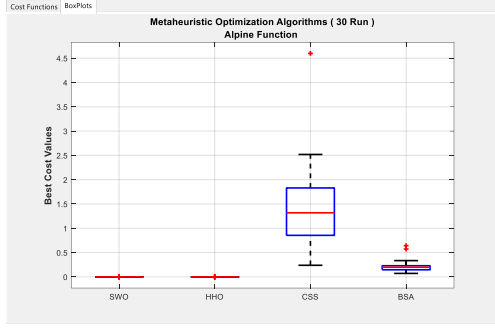
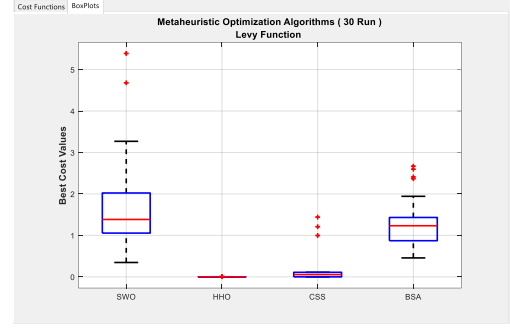
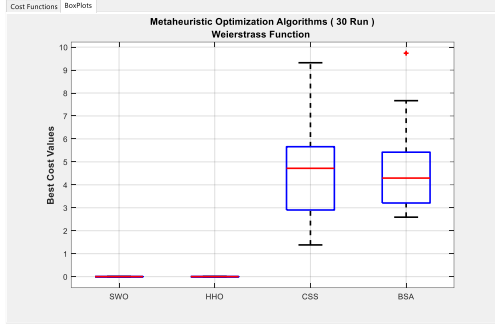
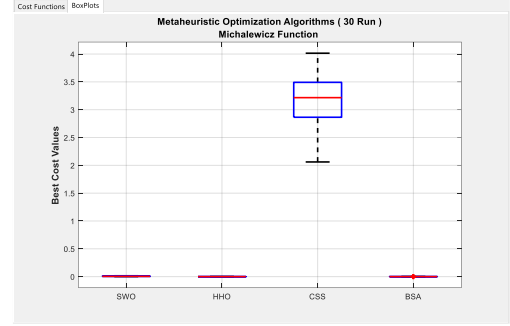
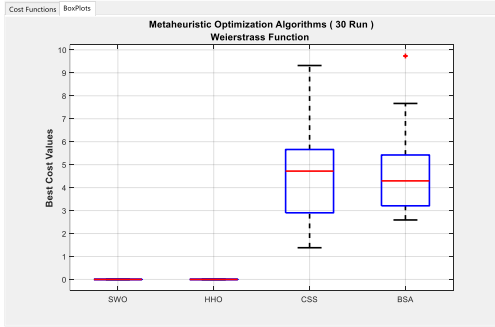
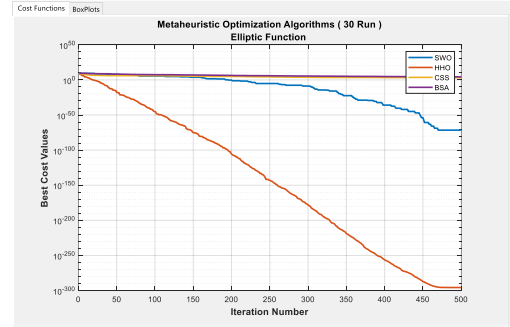
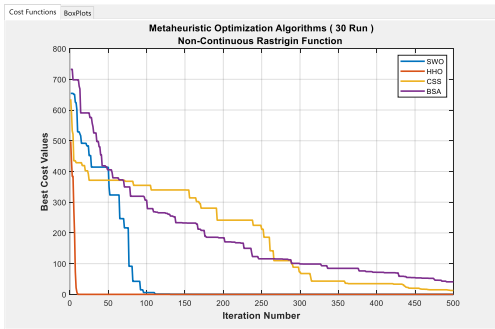
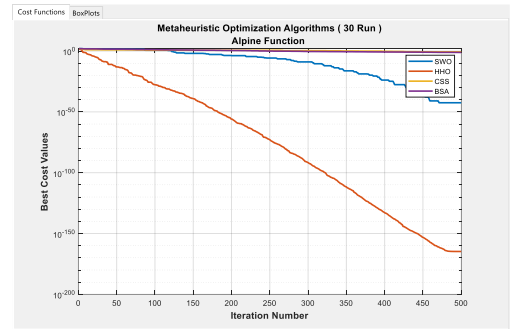
Tablo 2. Algoritmaların 30 Boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

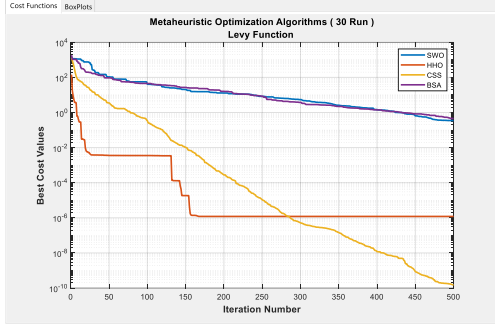
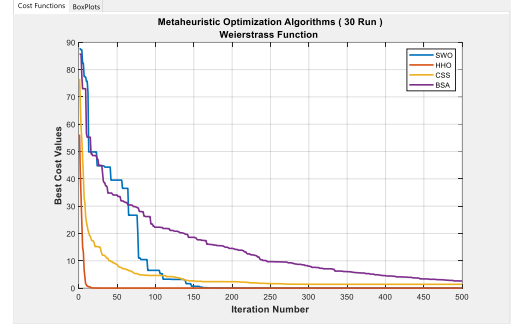
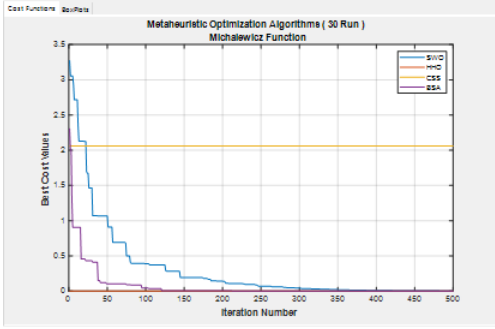
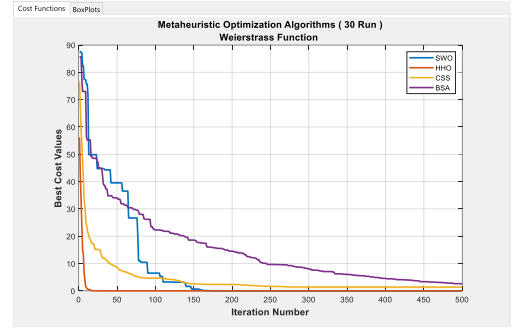
		<i>SWO</i>	<i>HHO</i>	<i>CSS</i>	<i>BSA</i>
f_1	EnKötü	1.397733262e-36	3.70795912e-272	2.593443940e+04	1.884212242e+03
	Ortalama	4.659110943e-38	1.23598743e-273	6.016533696e+03	2.545157701e+02
	Enİyi	2.005604575e-74	5.15654145e-298	2.441273321e+02	1.773107676e+01
	StdSapma	2.509007989e-37	0.000000000e+00	6.840519185e+03	3.622092889e+02
	Süre (s)	0.109776	0.211738	0.472049	0.158166
f_2	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.162244480e+02	2.779835658e+01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	7.749024028e+01	2.089370677e+01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	7.640420598e+00	1.630163451e+01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	6.749270924e+01	2.656748937e+00
	Süre (s)	0.12047	0.167277	0.475873	0.105965
f_3	EnKötü	3.505053821e-22	5.14554882e-157	1.340737322e+00	1.960382296e-02
	Ortalama	1.168912126e-23	3.25080897e-158	6.553980269e-01	5.083291179e-03
	Enİyi	5.533769836e-38	1.31674151e-172	1.131546252e-01	2.038355882e-03
	StdSapma	6.291660289e-23	9.88896553e-158	3.244607945e-01	3.216886321e-03
	Süre (s)	0.0924699	0.0967534	0.373527	0.113696
f_4	EnKötü	4.443827991e-01	7.149647793e-03	1.664973966e+00	3.247722878e-01
	Ortalama	5.489774096e-02	8.214041140e-04	1.258813204e-01	3.014839083e-02
	Enİyi	2.864129340e-03	3.956924182e-06	1.211753808e-16	1.329231841e-04
	StdSapma	1.015276885e-01	1.584175480e-03	3.130086335e-01	6.827050649e-02
	Süre (s)	0.126724	0.230745	0.462959	0.0940044
f_5	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.279579138e+00	7.339623406e-01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.751326142e+00	2.783378629e-01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	3.684543025e-01	1.684119921e-01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	9.606739882e-01	1.129142690e-01
	Süre (s)	0.948987	3.53288	2.09585	1.81953
f_6	EnKötü	8.598985752e-04	0.000000000e+00	1.994312920e+00	2.492185246e-08
	Ortalama	1.444335406e-04	0.000000000e+00	1.548527086e+00	8.307286831e-10
	Enİyi	1.276578562e-05	0.000000000e+00	9.106032516e-01	1.434947756e-23
	StdSapma	1.579055487e-04	0.000000000e+00	2.966525027e-01	4.473609377e-09
	Süre (s)	0.130058	0.376848	0.489844	0.197483
f_7	EnKötü	6.667417809e-01	2.250845284e-01	1.627529292e+00	9.855168948e+00
	Ortalama	6.666850886e-01	1.154940209e-01	7.133118136e-01	4.405471984e+00
	Enİyi	6.666677928e-01	2.882321837e-02	6.666669529e-01	7.178599397e-01
	StdSapma	1.831909903e-05	4.662332810e-02	1.752551541e-01	2.001336416e+00
	Süre (s)	0.0621574	0.135372	0.345279	0.0564814

6.2. Boyutu 50 Olan Test Fonksiyonları İçin

Bu bölümde 50 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonları SWO, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 28-34 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 35-41 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmalarla göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 3'te verilmiştir.

Şekil 28. f_1 için kutu grafiği (50-D)Şekil 29. f_2 için kutu grafiği (50-D)

Şekil 30. f_3 için kutu grafiği (50-D)Şekil 31. f_4 için kutu grafiği (50-D)Şekil 32. f_5 için kutu grafiği (50-D)Şekil 33. f_6 için kutu grafiği (50-D)Şekil 34. f_7 için kutu grafiği (50-D)Şekil 35. f_1 için yakınsama eğrileri (50-D)Şekil 36. f_2 için yakınsama eğrileri (50-D)Şekil 37. f_3 için yakınsama eğrileri (50-D)

Şekil 38. f_4 için yakınsama eğrileri (50-D)Şekil 39. f_5 için yakınsama eğrileri (50-D)Şekil 40. f_6 için yakınsama eğrileri (50-D)Şekil 41. f_7 için yakınsama eğrileri (50-D)

Şekil 28-41 arası gösterilen 50 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz. f_1 ve f_2 test fonksiyonları için Şekil 28-29'da SWO ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 35-36'da ise HHO'nun SWO'ya göre daha hızlı bir şekilde yakınsadıkları görülmektedir. f_3 test fonksiyonu için Şekil 30'da SWO ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 37'de ise HHO'nun SWO'ya göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. f_4 test fonksiyonu için Şekil 31'de HHO algoritmasının en iyi dağılıma sahip olduğu ve Şekil 38'de ise CSS algoritmasının HHO ve SWO'ya göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. f_5 test fonksiyonu için Şekil 32'de SWO ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 39'da ise HHO algoritmasının SWO ile birlikte iyi yakınsadıkları görülmektedir. f_6 test fonksiyonu için Şekil 33'te SWO, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 40'da ise HHO ile BSA algoritmalarının SWO'ya göre daha iyi yakınsadığı söylenebilir. f_7 test fonksiyonu için Şekil 34'te SWO ile HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 41'de ise HHO algoritmasının SWO'ya göre daha hızlı ve aynı değere yakınsadıkları ifade edilebilir.

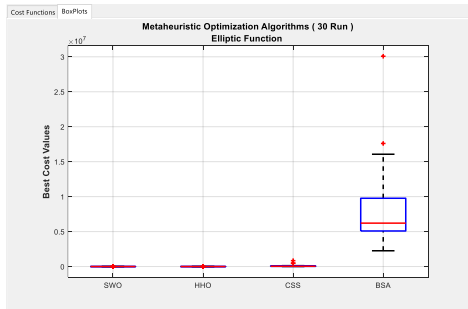
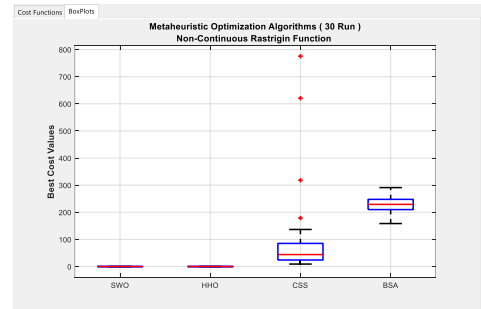
Tablo 3 incelendiğinde SWO algoritmasının f_2 ve f_3 'de en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonlarda ise HHO ve CSS algoritmalarının en iyi değerleri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından da SWO algoritmasının en iyi sürede f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , f_5 ve f_6 'da olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durumlar olan f_1 , f_3 , f_6 ve f_7 'de ortalama değerler açısından karşılaştırıldığında SWO algoritmasından daha iyi olduğu ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise f_7 hariç SWO algoritmasından daha iyi olduğu görülmektedir. CSS algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum olan f_4 'de ortalama değerler ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, SWO algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu görülmektedir.

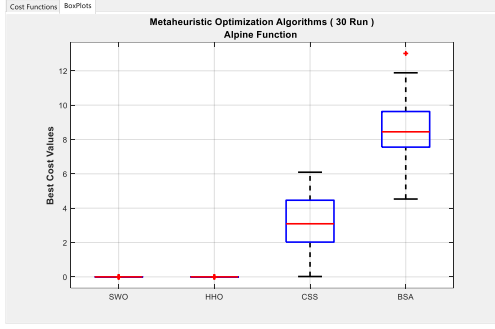
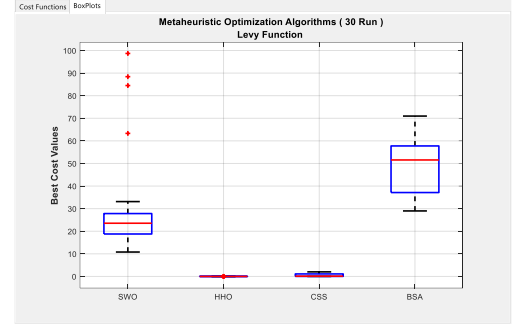
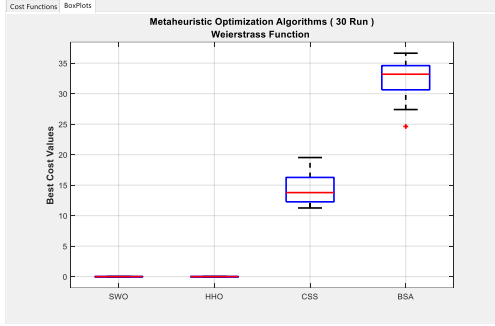
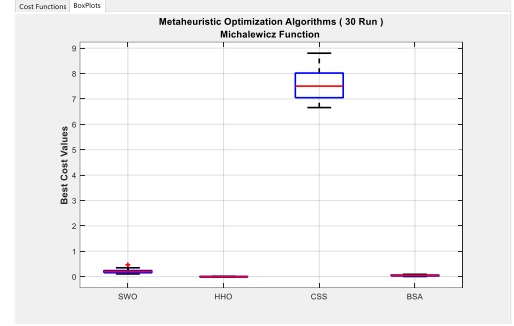
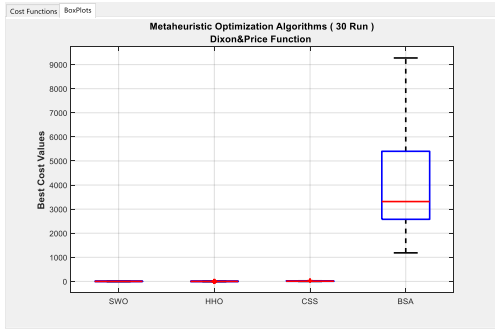
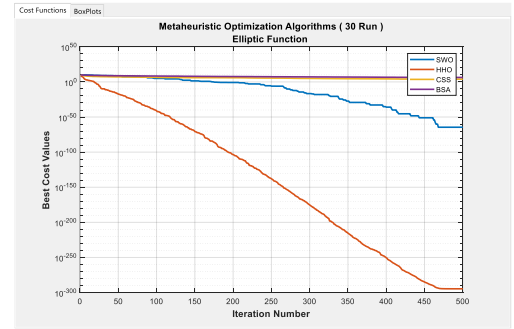
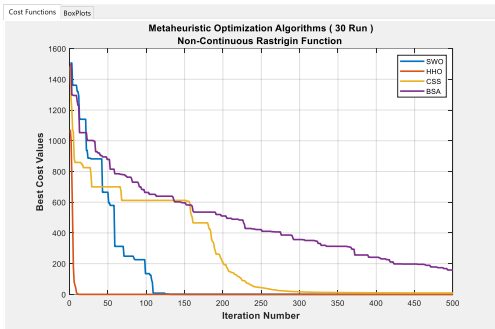
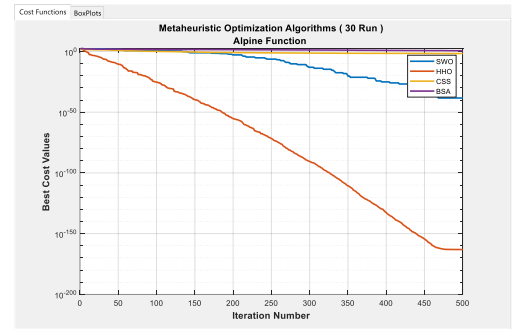
Tablo 3. Algoritmaların 50 Boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

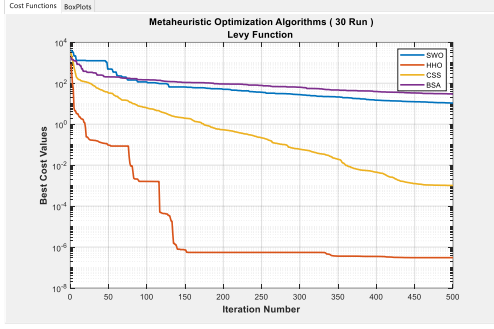
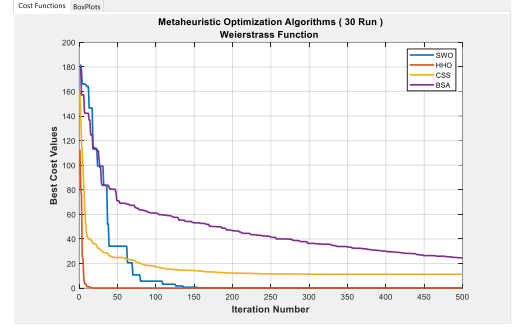
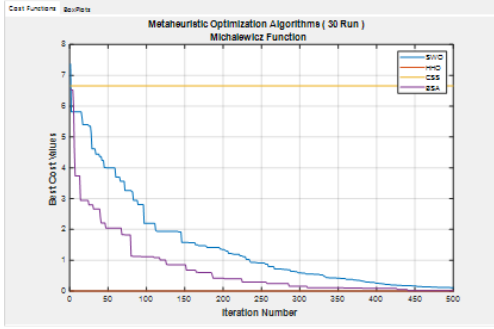
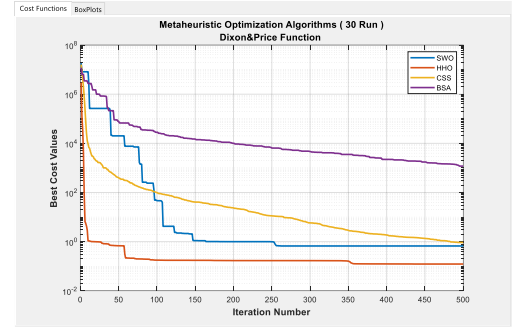
		<i>SWO</i>	<i>HHO</i>	<i>CSS</i>	<i>BSA</i>
f_1	EnKötü	9.571589029e-32	6.41821678e-277	2.871426770e+04	1.996977551e+05
	Ortalama	3.190529677e-33	2.20543306e-278	8.524039799e+03	6.290995202e+04
	Enİyi	2.910475160e-72	2.17773195e-296	1.697173203e+03	2.110301964e+04
	StdSapma	1.718152813e-32	0.000000000e+00	6.795176549e+03	3.691009619e+04
	Süre (s)	0.18087	0.351729	0.637389	0.267548
f_2	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.193025502e+02	7.066658934e+01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.573648572e+02	5.548026066e+01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.232521178e+01	4.088485310e+01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.351401446e+02	7.210412241e+00
	Süre (s)	0.132747	0.438639	0.778613	0.197815
f_3	EnKötü	1.381706423e-25	2.58990167e-156	4.597241239e+00	6.412854319e-01
	Ortalama	9.281336991e-27	2.74891215e-157	1.392081202e+00	2.096120013e-01
	Enİyi	3.146463027e-43	1.71220704e-165	2.383582911e-01	7.118716159e-02
	StdSapma	3.076449348e-26	5.88289395e-157	8.580532196e-01	1.223659873e-01
	Süre (s)	0.112161	0.119756	0.526845	0.131693
f_4	EnKötü	5.388983169e+00	8.679383717e-03	1.441088269e+00	2.668654382e+00
	Ortalama	1.718599612e+00	8.525003795e-04	1.655641668e-01	1.282638371e+00
	Enİyi	3.468654397e-01	1.199906907e-06	1.475388260e-10	4.569776301e-01
	StdSapma	1.128538148e+00	1.792242215e-03	3.586133844e-01	5.898837705e-01
	Süre (s)	0.118881	0.384402	0.538354	0.157207
f_5	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	9.318741365e+00	9.734084080e+00
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.578699805e+00	4.603357036e+00
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.381571537e+00	2.590997463e+00
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.722825154e+00	1.617311691e+00
	Süre (s)	1.65606	6.3429	3.4381	2.81924
f_6	EnKötü	1.543433394e-02	0.000000000e+00	4.015088642e+00	3.324551946e-05
	Ortalama	5.895320416e-03	0.000000000e+00	3.154592879e+00	4.914669733e-06
	Enİyi	1.451628031e-03	0.000000000e+00	2.060935886e+00	1.497777627e-16
	StdSapma	3.051713844e-03	0.000000000e+00	4.645106288e-01	8.646844487e-06
	Süre (s)	0.272809	1.04624	0.745826	0.327373
f_7	EnKötü	6.670122705e-01	2.497433539e-01	5.248177066e+00	1.326534283e+02
	Ortalama	6.668160079e-01	1.629861398e-01	8.463822177e-01	4.607752485e+01
	Enİyi	6.666946601e-01	7.391894133e-02	6.666703273e-01	2.138019777e+01
	StdSapma	8.387528316e-05	4.287515677e-02	8.193092468e-01	2.134020147e+01
	Süre (s)	0.0927233	0.242556	0.517351	0.078468

6.3. Boyutu 100 Olan Test Fonksiyonları İçin

Bu bölümde 100 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonları SWO, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 42-48 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 49-55 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmalarla göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 4'te verilmiştir.

Şekil 42. f_1 için kutu grafiği (100-D)Şekil 43. f_2 için kutu grafiği (100-D)

Şekil 44. f_3 için kutu grafiği (100-D)Şekil 45. f_4 için kutu grafiği (100-D)Şekil 46. f_5 için kutu grafiği (100-D)Şekil 47. f_6 için kutu grafiği (100-D)Şekil 48. f_7 için kutu grafiği (100-D)Şekil 49. f_1 için yakınsama eğrileri (100-D)Şekil 50. f_2 için yakınsama eğrileri (100-D)Şekil 51. f_3 için yakınsama eğrileri (100-D)

Şekil 52. f_4 için yakınsama eğrileri (100-D)Şekil 53. f_5 için yakınsama eğrileri (100-D)Şekil 54. f_6 için yakınsama eğrileri (100-D)Şekil 55. f_7 için yakınsama eğrileri (100-D)

Şekil 42-55 arası gösterilen 100 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz. f_1 ve f_2 test fonksiyonları için Şekil 42-43'te SWO ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 49-50'de ise HHO'nun SWO'ya göre daha hızlı bir şekilde yakınsadıkları görülmektedir. f_3 test fonksiyonu için Şekil 44'te SWO ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 51'de ise HHO'nun SWO'ya göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. f_4 test fonksiyonu için Şekil 45'de HHO ve CSS algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 52'de ise HHO ve CSS algoritmalarının SWO'ya göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. f_5 test fonksiyonu için Şekil 46'da SWO ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 53'te ise HHO algoritmasının SWO ile aynı değere yakınsadıkları görülmektedir. f_6 test fonksiyonu için Şekil 47'de HHO ile BSA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 54'te ise HHO ve BSA algoritmalarının SWO'ya göre daha iyi yakınsadığı söylenebilir. f_7 test fonksiyonu için Şekil 48'de SWO, HHO ve CSS algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 55'de ise HHO algoritmasının SWO'ya göre daha hızlı yakınsadığı ifade edilebilir.

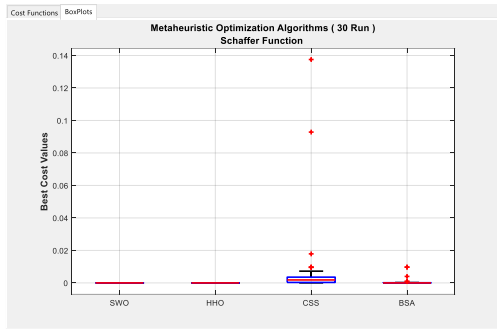
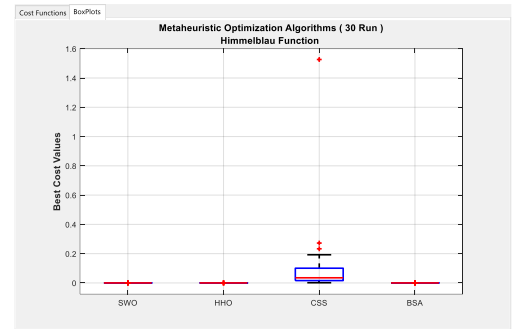
Tablo 4 incelendiğinde SWO algoritmasının f_2 ve f_5 'de en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonlarda ise HHO algoritmasının en iyi değerleri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından da SWO algoritmasının en iyi sürede f_1, f_2, f_4, f_5, f_6 ve f_7 'de olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durumlar olan f_1, f_3, f_4 ve f_6 'da ortalama değerler ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, SWO algoritmasından daha iyi olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum olan f_7 'de ortalama değerler açısından karşılaştırıldığında, SWO algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise SWO algoritmasından daha kötü değerlere sahip olduğu görülmektedir.

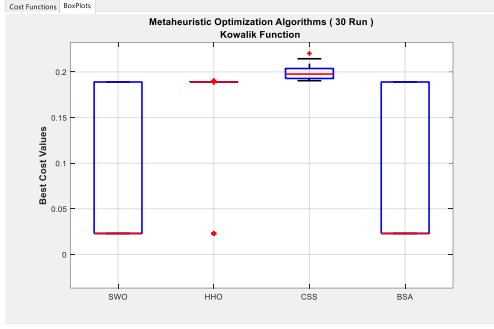
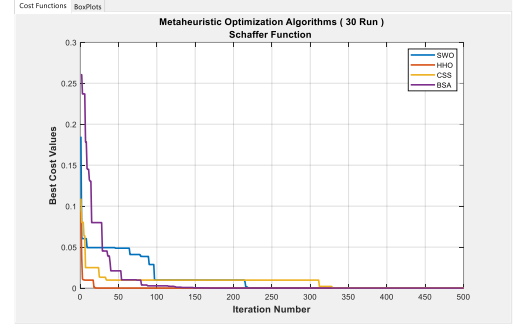
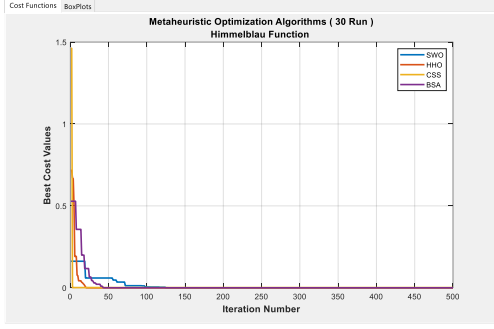
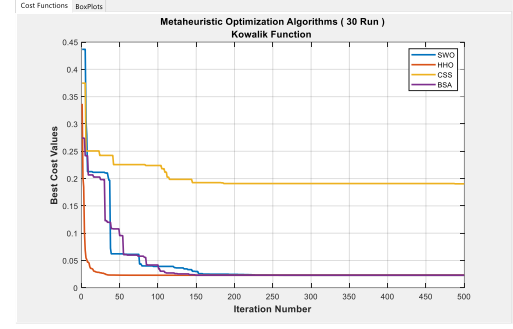
Tablo 4. Algoritmaların 100 Boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

		<i>SWO</i>	<i>HHO</i>	<i>CSS</i>	<i>BSA</i>
f_1	EnKötü	7.499726829e-32	4.94197136e-276	8.392134107e+05	3.008172789e+07
	Ortalama	2.572180203e-33	1.70090182e-277	1.017145069e+05	8.117098571e+06
	Enİyi	2.854394114e-65	2.27855811e-295	8.149396871e+03	2.257152310e+06
	StdSapma	1.345460675e-32	0.000000000e+00	1.773132206e+05	5.553688722e+06
	Süre (s)	0.313932	0.607552	0.903743	0.447395
f_2	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	7.754217525e+02	2.910749230e+02
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.035094238e+02	2.293255475e+02
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	9.142990366e+00	1.585523854e+02
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.714588525e+02	3.282452937e+01
	Süre (s)	0.148533	0.348959	0.619033	0.198577
f_3	EnKötü	1.921399255e-26	1.27449386e-154	6.093792619e+00	1.301058367e+01
	Ortalama	1.084071530e-27	7.49256779e-156	3.206623703e+00	8.549302892e+00
	Enİyi	4.724427380e-39	7.94069719e-164	2.101854071e-02	4.532600510e+00
	StdSapma	3.761239860e-27	2.71506276e-155	1.670842189e+00	1.811710678e+00
	Süre (s)	0.125445	0.12431	0.565801	0.121941
f_4	EnKötü	9.869290428e+01	1.654379434e-02	2.015888167e+00	7.097438424e+01
	Ortalama	3.055266038e+01	1.220085645e-03	5.124034157e-01	4.903051232e+01
	Enİyi	1.079862194e+01	3.046131352e-07	1.018482902e-03	2.898540536e+01
	StdSapma	2.191833382e+01	2.940982370e-03	6.374421062e-01	1.207821902e+01
	Süre (s)	0.150351	0.41846	0.624653	0.17086
f_5	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.952937480e+01	3.663805112e+01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.428026756e+01	3.255078018e+01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.125964899e+01	2.462647426e+01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.415380110e+00	2.888057420e+00
	Süre (s)	2.71994	10.1082	5.44946	4.96749
f_6	EnKötü	4.641408978e-01	0.000000000e+00	8.801297790e+00	9.096605556e-02
	Ortalama	2.079836821e-01	0.000000000e+00	7.552437615e+00	4.562120093e-02
	Enİyi	1.056742832e-01	0.000000000e+00	6.659663915e+00	5.905831101e-03
	StdSapma	7.496553776e-02	0.000000000e+00	5.942220006e-01	2.107831378e-02
	Süre (s)	0.341292	1.12568	1.01241	0.581091
f_7	EnKötü	6.679236633e-01	2.508023605e-01	3.567204171e+01	9.275321920e+03
	Ortalama	6.671542799e-01	1.803532231e-01	1.047601157e+01	4.037083487e+03
	Enİyi	6.666794193e-01	1.227066305e-01	9.270521615e-01	1.184919624e+03
	StdSapma	3.562909965e-04	3.725655588e-02	8.010874527e+00	2.091156085e+03
	Süre (s)	0.111163	0.289212	0.651036	0.116422

6.4. Sabit Boyutlu Test Fonksiyonları İçin

Bu bölümde 2 boyuttaki f_8 ve f_9 , 4 boyuttaki f_{10} test fonksiyonları SWO, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 56-58 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 59-61 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmalarla göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 5'te verilmiştir.

Şekil 56. f_8 için kutu grafiği (2-D)Şekil 57. f_9 için kutu grafiği (2-D)

Şekil 58. f_{10} için kutu grafiği (4-D)Şekil 59. f_8 için yakınsama eğrileri (2-D)Şekil 60. f_9 için yakınsama eğrileri (2-D)Şekil 61. f_{10} için yakınsama eğrileri (4-D)

Şekil 56-61 arası gösterilen sabit boyuttaki f_8 - f_{10} arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz. f_8 test fonksiyonları için Şekil 56'da SWO ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 59'da ise HHO'nun SWO'ya göre daha hızlı bir şekilde aynı değere yakınsadıkları görülmektedir. f_9 test fonksiyonu için Şekil 57'de SWO, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 60'da ise CSS, HHO ve BSA'nın SWO'ya göre daha hızlı ve fakat tüm algoritmaların aynı değere yakınsadıkları söylenebilir. f_{10} test fonksiyonu için Şekil 58'de HHO algoritmasının iyi bir dağılıma sahip olduğu ve Şekil 61'de ise HHO ve BSA algoritmalarının SWO'ya göre daha hızlı oldukları ifade edilebilir.

Tablo 5. Algoritmaların Sabit boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

		<i>SWO</i>	<i>HHO</i>	<i>CSS</i>	<i>BSA</i>
f_8	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.375220729e-01	9.715909878e-03
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.050293825e-02	8.638555997e-04
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	3.300863938e-05	0.000000000e+00
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.884166951e-02	2.478597898e-03
	Süre (s)	0.0716249	0.0820939	0.261233	0.0408193
f_9	EnKötü	1.768068617e-09	1.577721810e-29	1.526359564e+00	1.959677532e-22
	Ortalama	5.998376605e-11	1.367358902e-30	1.134555325e-01	6.589065130e-24
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.416855131e-03	0.000000000e+00
	StdSapma	3.172261287e-10	3.161573252e-30	2.717440129e-01	3.516722141e-23
	Süre (s)	0.0389045	0.065922	0.271835	0.0298616
f_{10}	EnKötü	1.889337486e-01	1.906626048e-01	2.202368095e-01	1.889337486e-01
	Ortalama	7.830682215e-02	1.558400003e-01	1.993740795e-01	8.383816546e-02
	Enİyi	2.299335416e-02	2.299335416e-02	1.903879040e-01	2.299335416e-02
	StdSapma	7.822504989e-02	6.642365387e-02	7.703616069e-03	7.996574845e-02
	Süre (s)	0.0482818	0.0764176	0.264134	0.0380855

Tablo 5 incelendiğinde SWO algoritmasının f_8 ve f_{10} 'da en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonda ise HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından da BSA algoritmasının en iyi sürede f_8 , f_9 ve f_{10} 'da olduğu görülmektedir. SWO algoritmasının f_{10} 'da ortalama değer açısından diğer algoritmalarından daha iyi standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise HHO ve CSS algoritmalarından daha kötü bir değere sahip olduğu görülmüştür. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum için f_8 'de ortalama değerler ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında SWO algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu görülmektedir.

7. Tartışma

Bu çalışmada SWO algoritmasının performansı hem sabit hem de değişken boyutlu fonksiyonlar üzerinde HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, SWO algoritmasının özellikle f_2 (Non-Continuous Rastrigin) ve f_5 (Weierstrass) gibi yüksek sayıda yerel minimum içeren fonksiyonlarda sıfır hata ile sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Bu durum, algoritmanın **yerel minimumlardan kaçınma ve küresel optimuma yakınsamada** etkili olduğunu göstermektedir.

HHO algoritması özellikle yakınsama hızı açısından güçlü bir performans sergilemiş ve SWO'ya göre bazı fonksiyonlarda daha hızlı sonuç üretmiştir. Ancak, HHO'nun bazı durumlarda standart sapma değerlerinin artması, çözüm kararlılığı açısından SWO'ya göre daha az istikrarlı olduğunu düşündürmektedir.

CSS algoritması, fizik tabanlı yapısı sayesinde bazı problemler üzerinde iyi sonuçlar vermiştir (örneğin f_4), ancak genel olarak yüksek hesaplama maliyeti ve süre açısından dezavantajlıdır. BSA ise bazı fonksiyonlarda rekabetçi performans göstermiş olsa da genelde SWO'ya göre daha düşük çözüm kalitesine sahiptir.

Tüm bu bulgular, SWO algoritmasının belirli problem türlerinde oldukça başarılı olduğunu ve uygun parametre ayarları ile daha da iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, bazı durumlarda yakınsama hızının HHO'ya kıyasla daha düşük olması, gelecekte SWO algoritmasında **adaptif parametre ayarı** ve **dinamik strateji geçişi** gibi iyileştirme yönlerinin değerlendirilebileceğini göstermektedir."

8. Sonuçlar

Bu çalışmada doğadaki dişi örümcek arılarının avlanma, yuva yapma ve çiftleşme davranışlarından ilham alan, yani doğadan ilham alan yeni bir sürü tabanlı meta-sezgisel algoritma olan SWO tanıtılarak çeşitli test fonksiyonları üzerinde uygulanmıştır. Bu algoritma örümceği arama, düşen örümceği takip etme ve kaçma, felçli örümceği yuvalama ve dişi örümcek arısının yumurtlamak için çiftleşme davranışı gibi doğadaki dişi örümcek arılarının davranışlarını taklit eden dört aşamadan oluşur. SWO'nun en büyük dezavantajı ise kontrol parametrelerinin performansını maksimuma çıkaracak değerleri bulmaktaki zorluktur.

MA'lar fizik, evrim, sürü ve insan tabanlı olmak üzere dört farklı ana kategoride oldukları için SWO ile elde edilen sonuçlar, HHO, CSS ve BSA algoritmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sürü tabanlı algoritmaya örnek olan SWO'ya karşılık çalışmada literatürden karşılaştırmak için seçilen algoritmalar HHO sürü, CSS fizik ve BSA ise evrim tabanlı algoritmalar. Algoritma seçim işleminde karşılaştırma için seçilen MA'ların bir adedinin aynı tabanlı gruptan diğer ikisinin farklı tabanlı gruptan olmasına özen gösterilmiştir.

Çalışmada biri unimodal, altı adedi multimodal olan 7 adet test fonksiyon 30, 50 ve 100 boyutlu ve üç adedi ise sabit boyutlu fonksiyon olmak üzere toplam on adet test fonksiyonu kullanılmıştır. Seçilen 30 ve 50 boyutlu yedi adet test fonksiyonun çözümlerinde en iyi değerlere sahip algoritmalar sırasıyla HHO (1 adet unimodal test fonksiyonu, 3 adet multimodal test fonksiyonu), SWO (2 adet multimodal test fonksiyonu) ve CSS (1 adet multimodal test fonksiyonu) olmuştur. Yedi adet test fonksiyonunun 100 boyutlu olması durumunda ise en iyi değerlere sahip algoritmalar sırasıyla HHO (1 adet unimodal test fonksiyonu, 4 adet multimodal test fonksiyonu) ve SWO (2 adet multimodal test fonksiyonu) olmuştur. Sabit boyut için yapılan değerlendirmede en iyi değerlere sahip algoritmalar sırasıyla SWO (2 adet multimodal test fonksiyonu) ve HHO (1 adet multimodal test fonksiyonu) olmuştur. Çalışmada tüm kutu grafikleri ve yakınsama eğrileri birlikte incelendiğinde SWO ve HHO algoritmalarının en başarılı algoritmalar olduğu görülmektedir. Ayrıca makaledeki Tablo 2, 3, 4, 5'in tümü birlikte incelendiğinde SWO'nun çalışmada kullanılan diğer algoritmalarla göre en iyi çözüm süresine sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışma SWO algoritmasının farklı test fonksiyonları üzerindeki performansının araştırılması için bir ön çalışma niteliği taşımaktadır. Bundan sonra yapılacak çalışmalardan biri algoritmanın elektrik elektronik mühendisliği alanında önemli bir yere sahip olan ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanması olacaktır. Ayrıca yapılacak çalışmalar arasında SWO'nun dezavantajı olan kontrol parametreleri üzerinde durularak algoritmanın performansını yükseltilmesi konusu da yer alabilir.

Referanslar

- [1] F. Cantas, S. Özyön, and C. Yaşar, "Runge Kutta Optimization for Fixed Size Multimodal Test Functions," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 144-155, 2022. DOI: 10.47897/bilmes.1219033.
- [2] S. M. Öztürk and A. Çifci, "A Study in Enhancing Battery Management Systems for Diverse Battery Types," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 122-136, 2023. DOI: 10.47897/bilmes.1385510.
- [3] T. Aktaş, İ. M. Temel, and A. Saygılı, "Comparative Analysis of Diabetes Diagnosis with Machine Learning Methods," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 22-32, 2024. DOI: 10.47897/bilmes.1447878.
- [4] A. İ. Çanakoğlu, "Monte Carlo Increased-Radius Floating Random Walk Solution For Potential Problems," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 13-21, 2024. DOI: 10.47897/bilmes.1441414.

- [5] K. Gencer, G. Gencer, and İ. H. Cizmeci, "Deep Learning Approaches for Retinal Image Classification: A Comparative Study of GoogLeNet and ResNet Architectures," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 123-128, 2024. DOI: 10.47897/bilmes.1523768.
- [6] U. Saray and U. Çavdar, "Comparison of Different Optimization Algorithms in the Fashion MNIST Dataset," *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (IJMSIT)*, vol. 8, no. 2, pp. 52-58, 2024.
- [7] M. D. Demirbaş and D. Çakır (Sofuoğlu), "Evaluation of the Performance of ANN Algorithms with the Bidirectional Functionally Graded Circular Plate Problem," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 6, no. 2, pp. 103-115, 2022. DOI: 10.47897/bilmes.1207256.
- [8] M. Lüy and N. A. Metin, "PID Control Medium Size Wind Turbine Control with Integrated Blade Pitch Angle," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 6, no. 1, pp. 22-31, 2022. DOI: 10.47897/bilmes.1091968.
- [9] B. Durmuş, "Opposite Based Crow Search Algorithm for Solving Optimization Problems," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 5, no. 2, pp. 164-170, 2021. DOI: 10.47897/bilmes.1031011.
- [10] Ö. Yavuz, "An Optimization Focused Machine Learning Approach in Analysing Arts Participative Behavior with Fine Arts Education Considerations," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 5, no. 2, pp. 241-253, 2021. DOI: 10.47897/bilmes.1029139.
- [11] M. D. Demirbaş, M. Oğuz, and İ. Erişen, "Investigation of Buckling Behavior of Beams with Artificial Neural Network," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 5, no. 1, pp. 94-106, 2021.
- [12] E. Dağdevir and M. Tokmakçı, "The Role of Feature Selection in Significant Information Extraction from EEG Signals," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 5, no. 1, pp. 1-6, 2021.
- [13] B. Alizada, "Improved Whale Optimization Algorithm Based On π Number," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 4, no. 1, pp. 21-30, 2020.
- [14] E. Göçmen and O. Derse, "A Tabu Search Algorithm for an Excavator Scheduling Problem," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 4, no. 1, pp. 1-11, 2020.
- [15] M. Taşova, "Effect on the Effective Diffusion and Activation Energy Values of Pea (*Pisum sativum* L.) Grains of Drying Temperature," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 3, no. 1, pp. 8-13, 2019.
- [16] B. Öztürk, L. Uğur, F. Erzincanlı, and Ö. Küçük, "Optimization of Polyethylene Inserts Design Geometry of Total Knee Prosthesis," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 2, no. 2, pp. 31-39, 2018.
- [17] D. Çakır and M. D. Demirbaş, "Modelling of One-directional Functionally Graded Circular Plates with Artificial Neural Network," *International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS)*, vol. 3, no. 1, pp. 42-50, 2019.
- [18] M. Abdel-Basset, R. Mohamed, M. Jameel, and M. Abouhawwash, "Spider wasp optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, no. 10, pp. 11675-11738, 2023..
- [19] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849-872, 2019.
- [20] A. Kaveh and S. Talatahari, "A novel heuristic optimization method: charged system search," *Acta Mechanica*, vol. 213, no. 3, pp. 267-289, 2010.
- [21] P. Civicioglu, "Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 219, no. 15, pp. 8121-8144, 2013.
- [22] J. Sui, Z. Tian, and Z. Wang, "Multiple strategies improved spider wasp optimization for engineering optimization problem solving," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 29048, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-78589-8.
- [23] İ. Çetinbaş, "Parameter extraction of single, double, and triple-diode photovoltaic models using the weighted leader search algorithm," *Global Challenges (Hoboken, NJ)*, vol. 8, no. 5, p. 2300355, 2024. DOI: 10.1002/gch2.202300355.
- [24] H. Liang, W. Hu, L. Wang, K. Gong, Y. Qian, and L. Li, "An Improved Spider Wasp Optimizer for UAV Three-Dimensional Path Planning," *Biomimetics*, vol. 9, no. 12, p. 765, Dec. 2024. DOI: 10.3390/biomimetics9120765.
- [25] A. Fathy, "An efficient spider wasp optimizer-based tracker for enhancing the harvested power from thermoelectric generation sources," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, no. 104878, p. 1-26, 2024. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104878.
- [26] H. Nabil, H. Tayeb, "Effect of chaos on the performance of spider wasp meta-heuristic optimization algorithm for high-dimensional optimization problems," *Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications*, vol. 5, no. 1, p. 143-171, 2025. DOI: 10.53391/mmnsa.1571964.
- [27] D. Evangeline, G. Usha, "Deep Learning Driven LSTM with Spider Wasp Optimizer Algorithm for Frictional Force Based Landslides Prediction Model," *Journal of Intelligent Systems and Internet of Things*, vol. 14, no. 1, p. 293-304, 2025. DOI: 10.54216/JISIoT.140123.
- [28] H. Nabil, H. Tayeb, "Effect of chaos on the performance of spider wasp meta-heuristic optimization algorithm for high-dimensional optimization problems," *Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications*, vol. 5, no. 1, p. 143-171, 2025. DOI: 10.53391/mmnsa.1571964.
- [29] Y. Gao, Z. Li, H. Wang, Y. Hu, H. Jiang, X. Jiang, D. Chen, "An Improved Spider-Wasp Optimizer for Obstacle Avoidance Path Planning in Mobile Robots," *Mathematics*, vol. 12, no. 2604, p. 1-25, 2024. DOI: 10.3390/math12172604.
- [30] S. Saber, S. Salem, "High-Performance Technique for Estimating the Unknown Parameters of Photovoltaic Cells and Modules Based on Improved Spider Wasp Optimizer," *Sustainable Machine Intelligence Journal*, vol. 5, p. 1-14, 2023. DOI: 10.61185/SMIJ.2023.55102.
- [31] <https://benchmarkfcns.info/fcns> (Access Date: 10.03.2025).
- [32] <https://al-roomi.org/benchmarks> (Access Date: 10.03.2025).

Evaluation of Intelligent Transportation Systems using SWOT Analysis and Risk Analysis

Aslıhan Gür ^a, Neşe Yeşilkaya ^b, Şevin Tatar ^c, Onur Derse ^{d,1}

^a Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0003-7054-9787

^b Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0001-3998-2895

^c Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0001-6327-3458

^d Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-4528-1999

Abstract

Intelligent Transportation Systems (ITS) are among the key topics that are drawing attention in today's rapidly evolving transportation landscape. The usage of ITS solutions is expanding globally, addressing the increasing demands for efficient, safe, and sustainable transportation systems. These systems, designed to enhance various aspects of transportation, such as traffic management, passenger information, fleet operations, and emergency response, bring both significant opportunities and challenges. In this study, a comprehensive SWOT analysis is performed on ITS architecture to evaluate its strengths, weaknesses, opportunities, and threats. The study also incorporates a risk analysis to assess the potential vulnerabilities and risks associated with the implementation and operation of ITS systems. The areas examined within the ITS architecture include passenger and driver information systems, traffic management systems, cargo and fleet management systems, public transportation systems, emergency management systems, electronic payment systems, and personal safety and security systems. Through expert opinions and a thorough review of the literature, the study aims to provide a detailed evaluation of ITS and its components. It also identifies the risks associated with ITS systems, such as technological limitations, high implementation costs, and potential security issues. By addressing these challenges and proposing strategies for mitigation, this research aims to guide future studies and support practitioners in their efforts to improve and expand ITS systems. The findings of this study provide actionable insights for the successful implementation of ITS by detailing specific weaknesses, threats, and opportunities for improvement. It also highlights the need for robust action plans that will ensure the resilience, sustainability, and long-term effectiveness of ITS solutions in the face of evolving transportation needs. This research will serve as a valuable resource for future efforts in ITS development and will contribute to the advancement of intelligent transportation solutions worldwide.

Keywords: "Intelligent transportation systems, intelligent transportation systems architecture, SWOT analysis, risk analysis."

1. Giriş

Teknolojideki son gelişmeler ve internetin sağladığı küresel bağlantı sayesinde, ulaşım sistemleri, insanların ve ürünlerin şehirlerde hareket etme şeklini değiştirecek derin bir dönüşüm geçirmektedir. Bu teknolojiyi kullanan şehirlerin hareketliliklerini ve ekonomik üretkenliklerini artırmaları ve kirlilik düzeylerini düşürmeleri beklenmektedir. Bu yeni ulaşım yaklaşımına Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) adı verilir [1].

Hızlı nüfus artışı, ekonomik büyüme, kaynak tüketimi gereksinimi ve artan şehirleşme gibi faktörler, ulaşım sektöründe yeni teknolojilerin takibini ve bilimsel ilerlemeler doğrultusunda akıllı çözümler geliştirmeyi zorunlu hale getirmiştir. AUS, ulaşımındaki zorluklara ileri teknolojik çözümler sunarak yaşamı kolaylaştırmayı [2], zaman ve enerjinin verimli kullanılmasını artırarak ülke ekonomisi, çevre ve toplum sağlığı için yararlı faaliyetler oluşturmayı amaçlar [3]. Ayrıca AUS, geliştirilebilir ulaşım sistemleri yönetimini, toplu taşıma ve bunun yanı sıra ulaşımın birçok yanını çevreleyen bireysel kararları kapsayan bir grup teknolojiyi temsil eder. AUS teknolojileri son teknoloji kablosuz ürünleri, elektronik ve otomatik teknolojileri; kara ulaşım güvenliğini, verimliliğini ve kolaylığını geliştirmeyi amaçlayan teknolojileri kapsar [4].

¹ Corresponding Author
E-mail Address: onurderse@tarsus.edu.tr

AUS, seyahat sürelerini azaltma, trafik güvenliğini artırma, mevcut yol kapasitelerini en etkin şekilde kullanma, mobilitayı artırma, enerji verimliliğini sağlama ve ülke ekonomisine katkıda bulunma hedefleri doğrultusunda geliştirilmiş karmaşık sistemlerdir. Bu sistemler, kullanıcılar, araçlar, altyapı ile merkez arasında çeşitli yönlü veri alışverişi, izleme, ölçme, analiz ve kontrol etme süreçlerini içerir. Ayrıca, çevreye verilen zararı azaltma amacıyla da çalışırlar [5].

1960'lı yılların sonlarında başlayan AUS uygulamaları, teknolojik hareketliliğin artmasıyla beraber günümüzde ulusal ve uluslararası düzeyde son derece kritik bir rol oynamıştır. Bu alanda öncülük etmiş olan ülkelerin arasında rekabet ortamının oluşması, AUS uygulamalarının çeşitlenmesine ve yaygınlaşmasına ivme kazandırmıştır [2]. Türkiye'de ise AUS, 2000'li yıllarda birçok ulusal politika belgelerinde yer almasıyla bir gereksinim olduğu ortaya çıkmıştır. Fakat bu konunun özel olarak ele alınması gereken bir konu olmasının farkındalığı ve izlenecek adımların saptanması, 2014 yılında oluşturulan Ulusal AUS Strateji Dokümanı ile gerçekleştirilebilmiştir [6].

Bu çalışmada, Türkiye için AUS Mimarisinin genel yapısına değinilip bu mimari içerisindeki servisler incelenmektedir. Çalışmada temel olarak AUS Mimarisi olarak yolcu ve sürücü bilgilendirme sistemleri, trafik yönetimi sistemleri, yük ve filo yönetim sistemleri, toplu taşıma sistemleri, acil durum yönetim sistemleri, elektronik ödeme sistemleri ve kişisel emniyet ve güvenlik sistemlerinin incelenmesi sağlanmaktadır. Uzman görüşlerinin alınarak yapıldığı çalışmada AUS ile ilgili SWOT Analizi gerçekleştirilmektedir ve SWOT Analizi sonuçlarındaki tehditler ve zayıf yönler değerlendirilerek ve Risk Analizi ile değerlendirilmektedir. Risk analizi sonuçlarına göre risklerin önceliklendirilmesi ve aksiyon planlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında amaçlara ve girişe yer verilmektedir. Çalışmanın ikinci kısmında AUS servisleri incelenmektedir ve çalışmanın üçüncü kısmında literatürün detaylandırılması yapılmaktadır. Çalışmanın dördüncü kısmında yöntemlere, beşinci kısmında ise uzman görüşleri, SWOT analizi ve risk analizi uygulamasına yer verilmektedir. Son kısımda ise sonuçlar ve tartışma kısmı sunulmaktadır.

2. Akıllı Ulaşım Sistemleri Mimarisi

AUS Mimarisi, bu başlık altında, yolcu ve sürücü bilgilendirme sistemleri, trafik yönetimi sistemleri, yük ve filo yönetim sistemleri, toplu taşıma sistemleri, acil durum yönetim sistemleri, elektronik ödeme sistemleri ve kişisel emniyet ve güvenlik sistemleri olmak üzere yedi alt başlıkta incelenmektedir.

2.1. Yolcu ve Sürücü Bilgilendirme Servisi

Yolcu bilgilendirme sistemi, yolcuların ulaşım ile ilgili bilgileri, bilgi ve iletişim teknolojilerini bir arada kullanarak eriştiği uygulamadır. Yolcu ve sürücülerin hangi ulaşım seçeceğini seyahate başlamadan önce belirleyeceği, yolculuk güzergâh bilgilerini, ulaşımın olası ne kadar süreceği vs. bilgilerine erişimini sağlayacak mobil uygulamalar, internet hizmetleri gibi birçok teknolojik uygulamaların kullanılabileceği servis türüdür [7]. Bu, yolcuların seyahat sırasında planlarını yapmada ve beklenmedik durumlarla karşı daha etkili çözüm ve başa çıkma fırsatları tanır. Yolcu bilgilendirme sistemleri daha iyi bir hizmet sunarak müşteri ve yolcu memnuniyetini arttırdığı için aynı zamanda toplu taşıma operatörlerine de fayda sağlamış olur. Kullanıcılara güzergâh bilgileri, farklı ulaşım seçenekleri, yolculuk saatleri ve benzeri birçok konuda bilgi sunulmaktadır. Gelişen ve değişen çağla birlikte mobil telefonlarının kullanımının artması sebebiyle belediyelerin kullanıcıların erişimi için birçok mobil uygulama oluşturulmuştur. Geliştirilen uygulamalar sayesinde kullanıcıların erişimine ihtiyaç duydukları ulaşım verileri en yakın doğrulukla ve gerçek zamanlı olarak ulaşmasını sağlamışlardır [8].

Yolcu ve sürücü bilgilendirme sistemleri için Qureshi ve Abdullah [9] yaptığı çalışmada, bölgesel çok modlu ve sürücü bilgi sistemi, karayolu ve toplu taşıma verilerinin toplanmasında merkezi odak noktasıdır. Bu sistem her türlü otoyol ve arteri, yolu, toplu taşımayı kapsamakta ve komşu şehirler, ülkeler gibi tüm alanları kapsamaktadır. Sistem, gerçek zamanlı veri toplama ve bilgilerin genel kalitesini ve yolcular için erişilebilirliği artırıyor. Yolcu bilgilendirme sistemi, yolcuların bilgileri gerçek zamanlı olarak tek platformda almasını kolaylaştırır ve yararlanır. Yolcu bilgilendirme sistemi kablosuz ve web entegrasyonu teknolojileri ile çalışır. Tektaş vd. [3] çalışmalarında, zamanı ve enerjiyi verimsiz kullanmayı engellemek AUS'nin amaçları arasında yer alır; bu da toplu taşıma kullanımına teşvik etme ve geliştirme konusunda önemli bir etkidir. Yolcu bilgilendirme sisteminin ana teması görevi bu olduğu söylenebilir. Yolcu bilgilendirme sistemlerinin sağlıklı ve amaca uygun kullanılması için son kullanıcıların farkındalığının yüksek olması gerekmektedir. Günümüzde, yolcu bilgilendirme sistemleri arasında öne çıkan uygulamalar arasında, NextBus ve benzeri sistemlerle birlikte yolculara bir sonraki toplu taşıma aracının varış zamanını bildiren akıllı duraklar bulunmaktadır.

2.2. Trafik Yönetim Sistemleri

Trafik yönetim sisteminin genel amacı karayolu trafiğini düzenlenmesi iyileştirilmesi gibi amaçlarla kullanılan teknolojik sistemlerdir. Bu sistemler başlıca trafik sıkışıklığını iyileştirme, kazaları engelleme, trafik sinyalizasyonunu ve yol durumunu izlemek ve yönetmek gibi amaçlar için kullanılır.

Ateş ve Korkmaz [10] çalışmalarında ulaşım hizmetinin güçlendirilmesi, trafik sıkışıklığını azaltmak ve trafik verimliliğini arttırmak gibi amaçların trafik yönetim sistemi tarafından sağlanması gerektiğini tanımlamıştır. Trafik yönetim sistemlerinin, trafik yönetiminin sorumluluğu olan alanlardaki oluşabilecek herhangi bir acil durum veya kazaya müdahale edebilme konusunda yardımcı olabileceği değerlendirilmektedir. Bu müdahale yardımı neticesi sayesinde ilgili kurumlarla iletişime geçilerek kazanın daha kötü sonuçlarının önlenmesi sağlanabilmektedir [11]. Trafik yönetim sistemleri güzergâh planlama, alternatif rota hesaplama, sürücü bilgilendirme, park yönetimi gibi pek çok alt uygulama alanları olan AUS'nin en önemli parçası ise, şehir içi kavşaklarda kullanıcıların dur/kalk zamanlarını optimize etmek, olabilecek trafik kazası risklerini önlemek, emisyon ve yakıt salınımını azaltmak amaçlarıyla yolcu ve sürücülere daha konforlu ve güvenli bir yolculuk imkânı sunan sistemleri içerir. Bunların neticesinde trafik yönetim sistemi gelecekte ve günümüzde şehir içi trafiğin daha dinamik ve akıcı bir şekilde yürütülmesinde katkısı olacağı görülmektedir [12]. Trafik yönetim sistemleri için Yardım ve Akyıldız [13] yaptığı çalışmada, ana yolların ve kent içi ulaşım ağının, trafik sinyal zamanlarının iyileştirilmesi, kontrolü ve koordine edilmesi hedefleriyle kurulmuş sistemlerdir. Doğru zamanlı sinyalizasyon denetimi, toplu taşıma ve acil durum taşıtlarına karşı duyarlı sinyal sürelerinin bulunması arter yönetimiyle uygulanmaktadır. Sinyalizasyonun denetlenmesi tüm arterdeki kavşaklar için sinyal devresi süresi derecesi ayarlama ve talep edilen unsura göre değişiklikler yapılmasına yardımcı olur.

2.3. Yük ve Filo Yönetim Sistemleri

Yük ve filo yönetim sistemi, bir filonun planlanması ve yönetilmesinden başlayarak, kalite yönetimi standartlarında yükün nihai müşteriye ulaştırılmasına kadar olan süreçlerin tümünün yönetilmesi ve izlenmesini sağlayan bir yönetim yaklaşımıdır. Bu sistem, süreçlerin sürekli iyileştirilmesini amaçlayarak operasyonel etkinliği artırmayı hedefler.

Karayolları Düzenleme Genel Müdürlüğüne yürütülen yol kenarı denetleme istasyonlarını yenilenmesi aşamasında plaka kontrol, otomatik ölçme sistemi ve ağırlık tespiti sistemleri kullanıcılara plaka, boyut ve ağırlık verilerini göstermesiyle bilgilendirmesi sağlanan değişken mesaj işaretleri gibi AUS teknolojileri Türkiye'de ticaret amaçlı yolcu ve yük taşıyan araçların belge, boyutu ve yük denetlemelerinin uygulanmasında yararlanılmaktadır [14]. Yük ve filo yönetim sistemleri için Fidan vd. [15] yaptıkları çalışmada, filo yönetimi çalışan araçların organizasyonu ve koordinasyonudur. Güçlü filo yönetimi, iş araçlarını tutmanın masrafını düşürmeye ve faydasını arttırmaya yardımcı olabilecek bir etkidir. Çoğunlukla bir aracın konumunu ve mekanik bilgilerinin izlenmesinin yanı sıra bir dizi yerleşik sensör ve kablosuz veri toplamada faydalanarak sürücü davranışının izlenmesinden oluşur.

2.4. Toplu Taşıma Sistemleri

Toplu Taşıma Sistemleri, herhangi bir taşıma firmasına ait olan taşıt filosunun yönetiminin tam zamanlı olarak, aracın mevcut konumunu izlemesiyle destekleyen sistemleri içerir. Araç izleme zemini GPS ve AVL (Automatic Vehicle Location) ile birleştirilmiş olan taşıtlar oluşturmaktadır. Bir merkezi birime taşıtın mevcut konumu hakkında verileri ulaşır ve burada gerçek konumu programlanan konum ile kıyaslaması yapılmaktadır [13]. Elektronik bilet kullanımı günümüzde çoğu büyükşehir ve il belediyeleri tarafından toplu taşıma için kullanılan AUS uygulamaları arasında yer almaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin 1995 yılında hizmete sunulmuş olan ve patenti İBB'ye ait olan Akbil, Türkiye'nin bu alandaki öncü uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin üzerinde çalıştığı bir diğer proje olan AkYolbil, filo takibi, yönlendirme ve yolcu bilgilendirme sistemidir. Bu proje sayesinde, toplu taşıma araçlarının konumlarını takip edilebilir, araç içinde ve duraklarda bulunan kullanıcıların araçların konumuyla ilgili bilgi alınması sağlanabilmektedir. Ayrıca, geçmiş trafik verileri kullanılarak kullanıcılara bekledikleri aracın tahmini varış zamanı hakkında bilgi verilebilmekte ve akıllı duraklarda olan elektronik panolarda kullanıcılar doğru zamanlı araç konumunu ulaşabilmektedir [16].

Toplu taşıma sistemleri için Yardım ve Akyıldız [13] çalışmalarında, toplu taşıma işletmesinin taşıt filosunun yönetimi doğru zamanlı olarak, araçların konumunu izleme amacını güden sistemlerdir. AVL ve GPS teknolojisine sahip araçlar, araç izleme altyapısını oluşturur. Araç-içi sensörler kullanma amacıyla araç performans değişkenleri, lastik basıncı, yağ/yakıt düzeyleri ve rutin bakım gibi olayları da elektronik şekilde bu sistemler aracılığı ile denetlenebilir. AVL'nin kullanımında talebe karşılık veren yönlendirmeyi ve programlamayı desteklemektedir. Toplu taşıma birimleri, sıradışı ulaşım taleplerini karşılayabilmek amacıyla araç durumu verileri ile gerçek zamanlı araç konumunu birleştirir. Qureshi ve Abdullah [9] yaptığı çalışmada, toplu taşıma yönetim sisteminin bir örneği, araç takibinin temelini oluşturan Otomatik Araç Konumu (AVL) teknolojisidir. AVL, programa bağlılığı kontrol etmek ve yolculara toplu taşıma araçlarının konumuyla ilgili bilgi sağlamak için kullanılan bir aracın gerçek zamanlı konumu hakkında bilgi sağlar. Toplu taşıma yönetim sektöründe AVL (otomatik araç konumu), BRT(Otobüs Hızlı Transit), TAD (seyahat asistanı cihazı) gibi çeşitli yazılımlar konum ve toplu taşıma süresinin iyileştirilmesi ve güvenlik operasyonları için çalışmaktadır.

2.5. Acil Durum Yönetim Sistemleri

Acil durum yönetim sistemleri, acil durum ekipleri, kurtarma görevlileri ve diğer ilgili paydaşların birlikte çalışan herhangi bir acil durum veya felaket durumunda hızlı ve etkin bir şekilde yanıt vermek için kullanılan planlama, organizasyon, koordinasyon ve iletişim sistemleri olarak tanımlanır. Bu sistemler genellikle acil durum planlaması, uyarı ve alarm sistemleri, toplu iletişim araçları, kriz yönetimi ve koordinasyon araçları gibi bileşenleri içerir. Temel hedefi, acil durum durumlarında hayat kurtarmak, zararları en aza indirmek ve olayların etkilerini azaltmaktır.

Acil durum yönetiminin üç ana unsuru bulunduğu ifade edilmektedir: filo yönetimi, güzergâh kılavuzluk hizmetleri ve acil durum aracı. Acil durum filo yönetimi, olay yerinde oluşabilecek acil durum ekipmanların ve araçların bilgisayar destekli akıllı sistemlerle donatılması olarak tanımlanır. Acil durum ekipmanı ve araçlarının konum ve durum verilerinin doğru zamanlı olarak izlenebildiği ve bu nedenle acil durum araçlarının yönetilebileceğinden bahsedilmektedir [13]. Acil durum yönetim sistemleri için Tufan [14] yaptığı çalışmada, karayollarında olan acil müdahale edilmesi gerektiren olayların trafik kazaları başta olmak üzere en kısa sürede tespit edilmesi ve gerekli geri bildirimlerin sağlanması, bu durumda trafik akışının getirdiği olumsuz etkileri hızlı bir şekilde çözülmesiyle, hem can kaybının önüne geçilmesinde hem de maddi hasarın en aza indirilmesini amaçlayan sistem acil durum yönetim sistemi olmak üzere ve bu sisteme ilişkin Türkiye’de yapılan birtakım çalışmalar mevcuttur.

2.6. Elektronik Ödeme Sistemleri

Elektronik ödeme sistemleri, internet tabanlı teknolojileri kullanarak mal ve hizmetlerin ödemesini otomatik olarak gerçekleştiren veya kayıtlara geçiren sistemlerdir. Bu sistemlere örnek olarak elektronik fon transferi (EFT), kredi kartları, akıllı kartlar ve borç kartları gösterilebilir. Elektronik ücret ödeme sistemlerine entegre edilen araçlar, yol üzerine kurulmuş özel yazılım ve donanımlar aracılığıyla tespiti yapılmaktadır. Tespiti ve iletişim süreci, taşıtın kimlik verilerinin okunması, doğrulanması ve hizmetin gerçekleştirilmesi süreçlerinden oluşmaktadır. Bu aşamalarda, kablolu ve kablosuz iletişim teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Geçiş sırasında aracın fotoğrafları, plaka veya kimlik verileri gibi ek veriler sağlanarak, kural ya da geçiş ihlallerinin belirlenmesi ve gereken yaptırımların uygulanması sağlanmaktadır [13]. Elektronik ödeme sistemleri için Abdulkadir vd. [17] da yaptıkları çalışmada; AUS, toplu taşımada ve otoyollarda ödenen ücretlerin alınmasında kolaylık sağladığını belirtmektedir. KGS, OGS ve araç içi ödeme sistemlerinin en bilindik örnekleridir. Bazı ülkelerde sıkışıklık oranı fazla araç (HOV: High-Occupancy Vehicle) şeritleri, sıkışıklık oranı fazla taşıt ücretlendirme şeridi (HOT: High-Occupancy Toll) ve kent merkezlerindeki sıkışıklık fiyatlandırması da elektronik ödeme sistemleri içerisinde değerlendirilen unsurlardandır. Yardım ve Akyıldız [13] çalışmalarında, ülkemizde son yıllarda nüfus artışıyla birlikte araç sayısı artış hızında artmış ve bu özellikle büyük şehirlerde trafik sorunlarıyla karşılaşılma durumunu etkilemiştir. Bu bağlamda, zaman kaybının önüne geçmek ve hızlı geçişin sağlama amacıyla, 1999 yılında Fatih Sultan Mehmet Köprüsü’nde “Otomatik Geçiş Sistemi (OGS)” uygulaması gelmiştir. Günümüzde ise, 49 ücret toplama alanında 129 şeritte OGS kurularak kullanıma hazırlanmıştır. Sistemde kayıtlı kişi sayısı 2004 yılı başından beri 300.000’i aşmaktadır. OGS’ye ek olarak yeni bir ödeme sistemi olan, Kartlı Geçiş Sisteminin (KGS) uygulaması benimsenmektedir. KGS’de, OGS’deki araçta olan elektronik etiket yerine, özel, yanında taşınabilir sürücüler için kartlar kullanılmaktadır. Otoyol’un Girişi ve çıkışında bulunan istasyonlara kurulmuş olan Kart Okuyucu/Yazıcı cihazda bu kart yaklaştırılıp okutulur (kart okuma süresi maksimum 0,5 sn.) ve geçiş ücreti ödemesi gişe memuruna gerek duyulmadan otomatik bir şekilde uygulanacaktır.

2.7. Kişisel Emniyet ve Güvenlik Sistemleri

Kişisel emniyet ve güvenlik sistemleri, bireylerin korunma ihtiyacını karşılamak için tasarlanmış teknolojik çözümlerdir. Bu sistemler, kişisel güvenliğini artırırken acil durumlarda hızlı müdahale ve yardım sağlamayı amaçlar. Günlük hayatta ve riskli durumlarda, bu sistemler bireylerin kendilerini güvende hissetmelerini sağlar ve olası tehlikelere karşı koruma sağlar.

Kişisel emniyet ve güvenlik sistemleri, tehlike ve risk içeren durumları tespit ederek tüm sistem kullanıcılarını uyarır. Beklenmeyen rampalar, tehlike arz eden virajlar, riskli üstgeçitler ve dikkatle devam edilmesi gerekli karayolu-demiryolu (hemzemin) geçitleri gibi risk içeren durumlar için ikazda bulunur. Bu uyarılar yalnızca araç kullanıcıları için değil aynı zamanda bisiklet sürücüleri, yolcular, yayalar ve hatta yolda bulunan hayvanlar için de geçerlidir [9]. EGM, Türkiye genelindeki karayollarına TEDES kurulumu için çalışmalarını sürdürmektedir. Bununla birlikte, il merkezlerinde kurulan MOBESE sistemi ile birleşik olarak emniyet ve güvenlik hizmetlerine de yardımcı olmaktadır. Türkiye’de belediyeler tarafından kurulmuş olan Elektronik Denetim Sistemi’ne (EDS) ek olarak, bu uygulamaların şehirlerarası karayollarına kurulmasının ve kullanımının artmasını, “Karayolu Trafik Güvenliği Stratejisi ve Eylem Planı” içinde ileri sürülen planlar arasındadır .

3. Literatur Taraması

AUS kapsamında yapılan risk analizi ve SWOT analizi çalışmaları bu başlık altında detaylandırılmaktadır. AUS için risk analizi yapan çalışmalar incelendiğinde, Khan [18] çalışmasında, toplu taşımaya odaklanarak kentsel ulaşımında Akıllı Ulaşım

Sistemi uygulamalarının risk analizi için metodolojik bir çerçeve sunmaktadır. AUS projelerinin belirsizlikler içerdiğinden yatırım kararlarını risk analizine tabi tutmakta fayda olduğu belirtilerek çalışmada AUS yatırımlarındaki risk değerlendirilmektedir. Zhao vd. [19] çalışmalarında AUS kullanımları için araç ağı sistemlerinde güvenliği alanındaki riskleri ve önerilen güvenlik çözümlerini incelemektedir. Qureshi ve Abdullah [9] çalışmasında; AUS yüksek kaza oranları, trafik sıkışıklığı, karbon emisyonları ve hava kirliliğini azaltmada; diğer bir yandan güvenliği, güvenilirlik derecesini, seyahat hızları, memnun yolcu ve trafik akışını arttırmada büyük bir rol oynayabileceğini belirtmektedir. Krivolapova [20] çalışmasında AUS projelerinin tanıtımı sırasında risk değerlendirmesi için bir algoritma önermektedir. Sabaliauskaite vd. [21] çalışmalarında İşbirlikçi AUS'nin güvenlik ve siber saldırı risklerinin analizini ele almaktadır. Kelarestaghi vd. [22] çalışmasında, araç içi ağı güvenlik açıklarının etkilerini incelemeye çalışmakta ve araç içi ağı tehlikeye atan bir saldırının olası sonuçlarını inceleyerek AUS güvenliği ve esnekliği ele alınmaktadır. Bu kapsamda, etki odaklı risk değerlendirmesi yoluyla AUS güvenliğine ilişkin gelişmekte olan ancak büyüyen literatüre katkıda bulunmak amaçlanmaktadır. Krundyshev ve Kalinin [23] çalışmalarında, akıllı ağı ortamdaki güvenlik riski analizini ele almaktadır. Avcı ve Koca [24] çalışmasında, akıllı raylı sistemlerde ulaşım güvenliği açısından Analitik Hiyerarşik Süreç (AHP) performans kriterleri ile birlikte risk analizini 10 farklı uzmanın görüşleri dikkate alınarak incelemektedir.

Jarašūniene [25] çalışmasında, Litvanya için AUS'nin SWOT analizini değerlendirmiştir. AUS için insanların vakit, hareketlilik, sağlık vb. açılardan önemli kayıplar sağlanacağını belirterek sosyal sorunların ele alınması gerektiğinden bahsetmiştir. Farklı ulaşım modlarını entegre kullanımı erişilebilirliği, hareketlilik, trafik ve çevre güvenliğini arttıracaklarını belirtmiştir. İlgili bölgesel ve yerel programlarla birlikte hükümete ait uzun vadeli bir AUS geliştirme programı yapılması ve gelişimi için bir vizyonun oluşturulması gerektiğini dile getirmiştir. Mitsakis ve Iordanopoulos [26] çalışmasında, Güneydoğu Avrupa'daki ülkeler için AUS'nin SWOT analizi ile değerlendirilmesini ele almaktadır. Genel değerlendirme ile ulaştırma sektöründe kullanılan teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması amacıyla bir araştırma geliştirme taahhüdünün bulunması sürekli gelişen AUS'ne katkı sağlamaktadır. Karayolu taşımacılığının etkin bir role sahip olması nedeniyle verimliliğin ve karayolu ağı güvenliğini arttırmaya yönelik stratejiler alınmıştır. Ar-Ge faaliyetlerine katkı sağlamak, eğitimli insan gücü sayısını arttırmak gibi hedefler fırsat faktörleri içinde değerlendirilebilir. Çeşitli düzeylerde birlikte çalışabilirliği sağlamak için standartların gerekli olduğunu belirtmektedir. Ağırlıklı olarak geleneksel pazara odaklanmak, ulusal eylem planını uygulamada eksik kalınması ve finansman karar vericilerin (hükümet, devlet şirketleri), sık sık değişmesinden dolayı sürecin devamlılığını etkilemesi AUS stratejilerini olumsuz etkilemektedir. Namugenyi vd. [27] çalışmasında, IPM (Birleşik Zararlı Organizma Denetimi) bağlamında nakliye işinin gücü için karayolu, demiryolu, hava ve hatta deniz yoluyla öncelikli güzergahlara sahip taşıma sistemlerini devreye sokulması gerektiğinden bahsetmiştir. Çalışmasında, ekonomik yaptırımlar, siyasi istikrarsızlık gibi nedenler taşımacılık işletmelerine yönelik tehditler olarak belirtmektedir. Yatırımcılardan finansman açısından fayda sağlanabilmesini arttırmak için iyi planlanmış ve analiz edilmiş bir AUS stratejisi geliştirilmesi ve mevcut Avrupa yasal düzenlemelerinin entegre sistemler için takip edilmesinin önemli olduğunu vurgulamaktadır.

4. Method

Bu kısımda çalışmanın akışı ve kullanılan metotlar tanıtılmaktadır. Çalışmada uzman görüşleri toplanarak ve SWOT Analizi ve L tipi Risk Analizi yöntemleri kullanılmaktadır.

4.1. Uzman Görüşlerinin Toplanması

Uzmanlar, sektördeki deneyimleri, akademik geçmişleri ve konuya ilişkin uzmanlıkları göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Uzmanlar, kendi alanlarında uzmanlığıyla projenin farklı yönlerini değerlendirerek, SWOT analizine ve Risk Analizine önemli bir katkı sağlamaktadır. Uzmanların analiz, strateji geliştirme, raporlama ve danışmanlık gibi görevler üstlendiği görülmektedir. Aşağıda uzmanlar hakkında kısa bilgiler verilmiştir:

- Uzman 1 (U1): Öğretim Üyesi olan uzman, analizlerde ve strateji geliştirme süreçlerinde liderlik yapmaktadır. Alanındaki derin bilgisiyle, projenin güçlü ve zayıf yönlerini belirlemekte önemli bir rol oynamaktadır.
- Uzman 2 (U2): Öğretim Elemanı olan uzman, akademik araştırmalardaki deneyimiyle projenin akademik boyutunu güçlendirmektedir. Mevcut literatürü analiz ederek, projeye değerli bir bakış açısı sunmaktadır.
- Uzman 3 (U3): Öğretim Üyesi olan uzman, strateji geliştirme sürecindeki tecrübesiyle projenin stratejik yönlendirmesine katkıda bulunmaktadır. Alanındaki bilgi birikimiyle, projenin başarılı bir şekilde yürütülmesine yardımcı olmaktadır.
- Uzman 4 (U4): Servis mühendisi olan uzman, AUS alanında uluslararası dergide makale yayınlamıştır. Bu alandaki bilgi ve engin deneyimlerine başvurulmuştur.
- Uzman 5 (U5): Öğretim Üyesi olan uzman, ulaştırma alanındaki uzmanlığıyla çalışmanın değerlendirmektedir. Ulaştırma sektöründeki deneyimiyle, projenin sektörel etkilerini değerlendirmektedir.
- Uzman 6 (U6): Öğretim Üyesi olan uzman, endüstri mühendisliği alanındaki uzmanlığıyla projenin endüstriyel boyutunu güçlendirmektedir. Endüstriyel süreçler ve stratejiler konusundaki bilgisiyle, projenin iş dünyasındaki etkilerini değerlendirmektedir.

- Uzman 7 (U7): Öğretim Üyesi olan uzman, endüstri mühendisliği alanındaki derin bilgisiyle projenin endüstriyel süreçlerini analiz etmekte ve stratejiler geliştirmekte önemli bir rol oynamaktadır.

4.2. SWOT Analizi

SWOT Analizi, bir organizasyon, bir plan, bir proje, bir kişi veya bir iş faaliyetinde bulunan 'güçlü yönleri', 'zayıf yönleri', 'fırsatları' ve 'tehditleri' değerlendirme amacıyla uygulanan bir analiz yöntemidir [27]. SWOT Matrisi olarak da bilinir ve stratejik planlama için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [28].

Çalışmada SWOT Analizi kullanılarak AUS servislerinin değerlendirilmesi gerçekleştirilmektedir. Veriler yedi farklı uzmandan yapılandırılmış anket yöntemiyle toplanmaktadır. SWOT Analizi ile birlikte yolcu ve sürücü bilgilendirme sistemleri, trafik yönetim sistemleri, yük ve filo yönetim sistemleri, toplu taşıma sistemleri, acil durum yönetim sistemleri, elektronik ödeme sistemleri ve kişisel emniyet ve güvenlik sistemlerinin değerlendirilmesi sağlanmaktadır.

4.3. Risk Analizi

L tipi matris yönteminde elde edilen risk skorlarının kategorize edilmesi gerçekleştirilmektedir. Tablo 1'de olasılık şiddet bileşikleri verilmiştir. Tablo 1'deki kırmızı alanlar ciddi/önemli riskleri, sarı alanlar orta düzey riskleri ve yeşil alanlar düşük düzeydeki riskleri tanımlamaktadır. Risk analizi, her bir riskin olasılığı ve etkisi üzerinden hesaplanmıştır. Olasılık ve etki, 1 ile 5 arasında bir puanlama sistemiyle değerlendirilmiş, 1 en düşük, 5 ise en yüksek olasılık veya etkiyi temsil etmektedir. Risk skoru şu formülle hesaplanmıştır: Risk Skoru = Olasılık x Etki [29]. L tipi risk matrisinin kullanım amacı, risklerin daha sistematik bir şekilde değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesidir. Bu matris, yöneticilerin hangi risklere öncelik vermeleri gerektiğini, hangi risklerin kritik olduğunu ve hangi risklere yönelik daha az dikkat gösterilmesi gerektiğini belirlemelerine yardımcı olur. Olasılık ve etki arasındaki ilişkiyi görsel olarak sunarak, organizasyonların riskleri daha etkili bir şekilde yönetmelerini sağlar. Matrisin kullanımı, risklerin organizasyonel hedefler üzerindeki potansiyel etkilerini minimize etmeye yönelik stratejilerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar.

Tablo 1. Olasılık/ Şiddet Bileşikleri

Olasılık (O)		Şiddet / Etki (S)				
		5	4	3	2	1
		Çok Ciddi	Ciddi	Orta	Hafif	Çok Hafif
5	Çok Yüksek	25	20	15	10	5
4	Yüksek	20	16	12	8	4
3	Orta	15	12	9	6	3
2	Düşük	10	8	6	4	2
1	Çok Düşük	5	4	3	2	1

Çalışmada, SWOT (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar, Tehditler) Analizi sonuçları ile alanındaki uzmanların görüşleri birleştirilerek, organizasyonun zayıf yönleri ve karşılaşılabileceği potansiyel tehditler üzerine kapsamlı bir Risk Analizi yapılmaktadır. SWOT Analizi, organizasyonel performansın değerlendirilmesi ve stratejik yönelimlerin belirlenmesi açısından önemli bir araçtır. Ancak, yalnızca SWOT'tan elde edilen verilerle risklerin doğru bir şekilde analiz edilmesi mümkün olmayabilir. Bu nedenle, uzman görüşleri ile desteklenen bir yaklaşım benimsenerek, zayıf yönlerin ve tehditlerin olası etkileri daha objektif ve derinlemesine bir şekilde incelenmektedir. Risk Analizi sürecinde, bu unsurların organizasyon üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri değerlendirilmekte ve bunlara karşı alınabilecek önlemler ile stratejik çözümler önerilmektedir. Bu entegre yaklaşım, hem teorik hem de pratik açılardan güçlü bir risk yönetimi stratejisinin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

5. Uygulama

5.1. Akıllı Ulaşım Sistemleri için SWOT Analizi Uygulaması

Çalışmanın bu aşamasında detaylı literatür incelemeleri ve uzman görüşleri alınarak AUS sistemleri için SWOT Analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından yayınlanan Ulusal AUS Strateji Belgesi ve 2020-2023 Eylem Planı kapsamında AUS için SWOT Analizi belgesi de dikkate alınmıştır.

Güçlü Yönler

- Yük ve filo yönetim sistemlerinin mobilitayı ve müşteri değerini iyileştirmesi.

- Yük yönetimi sistemi, taşıyıcı ve işletmeler arası operasyonları geliştirerek ulaşım sisteminin daha zamanında işletilmesi ve tedarikini sağlaması.
- Büyük araçların altyapıya verdiği zararın azaltılması.
- Toplu taşıma yönetim sistemlerinin işletme verimliliğini sağlaması.
- Trafik kurallarının ihlallerinin önüne geçmesi.
- Hareketlilik, düşük işletme maliyetleri, düşük enerji tüketimi

Zayıf Yönler

- Zayıf altyapı sistemlerinin kullanılması (ZRS 1).
- Otoyol sisteminde kullanılan (GPS, döngü kameraları, sabit sensörle vb.) teknolojilerin yüksek maliyet barındırması (ZRS 2).
- Otoyol sisteminde kullanılan teknolojilerin bakım sorunu (ZRS 3).
- Otoyol sisteminde kullanılan teknolojilerin sınırlı kapsama alanı sorunlarına sahip olması (ZRS 4).
- AUS uygulamaları altında olan trafik sinyalizasyon hesabı eksikliği (ZRS 5).
- Sistem kullanıcılarının internet bağlantısı erişimi problemi (ZRS 6).
- Ulusal AUS mimarisinin ve AUS ile ilişkili standartların tam olarak saptanamaması (ZRS 7).
- Toplu taşıma sisteminin diğer ulaşım servisleri ile entegrasyonunun yeterli olmaması (ZRS 8).
- Ulaşımına ait veri toplanması ve paylaşımında paydaşlar arasında yaşanan koordinasyonun yeterli olmaması (ZRS 9).
- AUS konusunda uzmanlaşmış insan kaynağı açığının bulunması (ZRS 10).
- Olası yazılım ve ağ hatası sonucu sistemin bozulma ihtimali (ZRS 11).

Fırsatlar

- Yük yönetim sistemlerinin trafik sıkışıklığını, kirliliği, gürültüyü ve enerji kaygılarını azaltması.
- Toplu taşıma yönetim sistemlerinin, yolcunun emniyetini, gerçek zamanlı bilgilere ulaşımını sağlayarak hizmet güvenilirliğini arttırması.
- İş gücü tasarrufuna imkân vermesi.
- Yakıt ve karbondioksit (CO₂) tüketimini azaltması.
- Ekonomik büyüme ve gelişmeye katkı sağlaması.
- Tüm paydaşlara herhangi bir değişikliğin anında bildirilmesi.

Tehditler

- Artan nüfus artışının arter ve trafik sıkışıklığına neden olması (TRS 1)
- Uluslararası AUS platformunda aktifliğin düşük olması (TRS 2).
- Sahada kullanılan AUS servis materyallerinin (dedektör, MOBESE, kamera vb.) kötü hava şartlarında zarar görmesi (TRS 3).
- Akıllı teknolojik ürünlerinin kullanımında güvenlik açıklarının olması riski (TRS 4).
- Bir dizi teknolojinin otomasyonu ile bağlantılı olarak işsizlik seviyesinde potansiyel artış (TRS 5).
- AUS'un dış unsurlarına yönelik fiziksel etki ve hasar tehdidi (TRS 6).
- Veri veya sinyal kaybına yatkın olması (TRS 7).
- Avrupa'daki AUS gelişmelerinin çok hızlı olması ve yerel devlet kullanıcılarının teknolojik değişikliklere uyum sağlayamaması (TRS 8).
- AUS için gerekli olan altyapı yatırım maliyetlerinin yüksek olması (TRS 9).
- AUS çözümlerinde kullanılan ürünlerde yerlilik ve millilik oranının az olması (TRS 10).
- Küreselleşme ve artan uluslararası rekabet (TRS 11).

5.2. Risk Analizi Uygulaması

Bu çalışmada uzman görüşleri alınarak SWOT analizinden elde edilen zayıf yönler ve tehditler için risk analizi gerçekleştirilmektedir. Belirlenmiş konularda uzmanlığa sahip yedi kişiden alınan verilerle risk analizi gerçekleştirilmektedir.

İncelenen zayıf yönlerin uzman görüşleri ve risk skoru ortalamaları Tablo 2'deki ve Tablo 3'deki gibidir. Tablo 2'de ve Tablo 3'de Uzmanlar U1'den U7'ye, Zayıf Yönler ZRS 1'den ZRS 11'e kadar isimlendirilmektedir. Olasılık değeri O, Şiddet değeri S olarak ifade edilmektedir. ZRS 10 – Uzman İnsan Kaynağı Eksikliği riskinin yüksek olmasının nedeni AUS sistemlerinin planlama, uygulama ve sürdürülebilirliğinde teknik uzmanlık kritik rol oynamasıdır. Eğitimli personelin eksikliği; yazılım hataları, sistem çökmeleri ve verimsiz operasyonlar gibi doğrudan riskleri artırır. Bu nedenle, insan kaynağı eksikliği stratejik düzeyde bir zafiyet oluşturmaktadır.

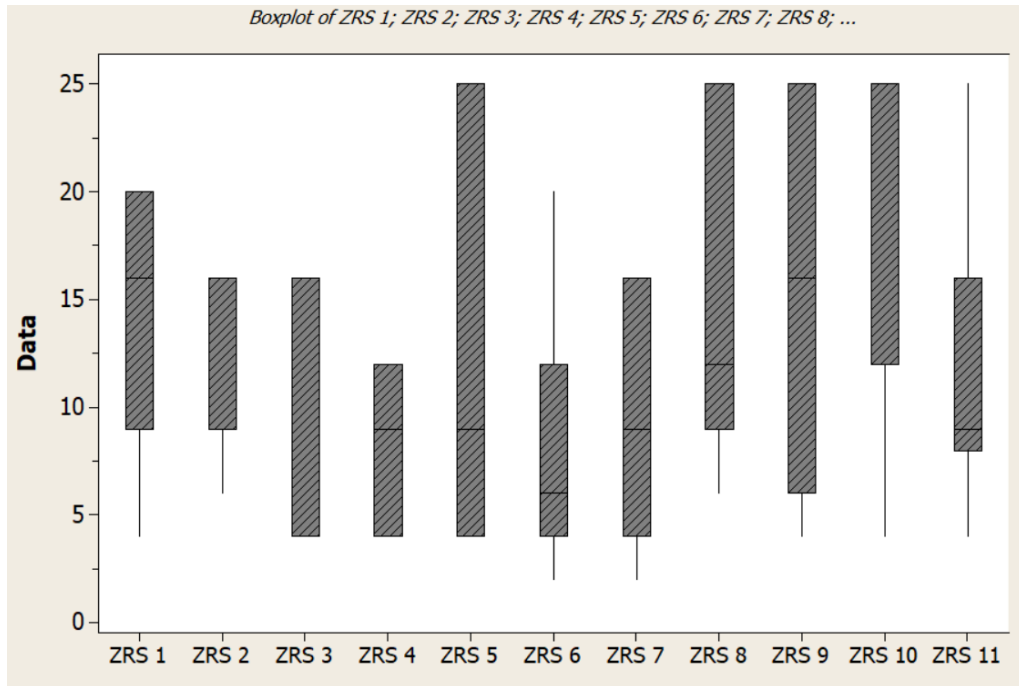
Tablo 2. Zayıf Yönler için Uzman Görüşleri

	U1		U2		U3		U4		U5		U6		U7	
O/S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S
ZRS 1	5	4	4	3	5	4	2	2	4	4	3	3	4	4
ZRS 2	4	4	3	2	4	4	3	3	3	3	3	3	4	3
ZRS 3	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4	2	2	2	2
ZRS 4	3	4	4	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2
ZRS 5	5	5	5	5	2	2	3	2	4	5	3	3	2	2
ZRS 6	5	4	1	2	2	2	3	3	3	4	2	2	2	3
ZRS 7	3	3	4	4	2	2	5	3	1	2	4	4	2	2
ZRS 8	4	3	5	5	4	4	5	5	2	3	3	3	4	3
ZRS 9	5	3	5	5	4	4	5	5	4	4	2	2	3	2
ZRS 10	4	4	4	3	4	3	5	5	5	5	2	2	4	3
ZRS 11	5	5	2	4	3	4	4	4	4	1	3	3	3	3

Tablo 3. Zayıf Yönler için Risk Skorları

Zayıf Yönler	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	Risk Skor Ort.
ZRS 1	20	12	20	4	16	9	16	13,86
ZRS 2	16	6	16	9	9	9	12	11
ZRS 3	16	16	16	4	16	4	4	10,86
ZRS 4	12	12	9	4	4	9	6	8
ZRS 5	25	25	4	6	20	9	4	13,29
ZRS 6	20	2	4	9	12	4	6	8,14
ZRS 7	9	16	4	15	2	16	4	9,43
ZRS 8	12	25	16	25	6	9	12	15
ZRS 9	15	25	16	25	16	4	6	15,29
ZRS 10	16	12	12	25	25	4	12	19
ZRS 11	25	8	12	16	4	9	9	11,86

Zayıf Yönler için yapılan uzman değerlendirmeleri sonucunda oluşturulmuş Box-Plot grafiği Şekil 1'deki gibidir. ZRS 5, ZRS 9 ve ZRS 8 risklerinin geniş bir aralığa sahip olduğu görülmektedir. Bu riskler dışındaki riskler için uzmanların daha benzer kararlar aldığı görülmektedir. ZRS 5 – Trafik Sinyalizasyon Eksikliği riskinin uzmanların bir kısmı tarafından etkisini “çok yüksek” (25) olarak değerlendirirken, diğer kısmı “düşük” (4) olarak belirtmiştir. Bu durum, uygulamada sinyalizasyon sistemlerinin farklı şehirlerde farklı düzeyde olmasından kaynaklanabilir.



Şekil 1. Zayıf Yönler için Box-Plot Grafiği

İncelenen tehdit yönlerinin uzman görüşleri ve risk skoru ortalamaları Tablo 4 ve Tablo 5'deki gibidir. Tablo 4'de ve Tablo 5'de Uzmanlar U1'den U7'ye, Zayıf Yönler TRS 1'den TRS 11'e kadar isimlendirilmektedir. Olasılık değeri O, Şiddet değeri S olarak ifade edilmektedir. TRS 4 – Güvenlik Açıkları riskinin yüksek çıkması sebebi veri güvenliğinin sağlanamaması, AUS sistemlerini siber saldırılara açık hale getirerek ulaşım sisteminin güvenilirliğini zedelemesidir. Trafik sinyal sistemlerine yapılacak bir saldırı, trafik kazalarına, yönlendirme hatalarına ve kamu güvenliğinin zedelenmesine neden olabilir. Bu nedenle, güvenlik açıkları kritik tehdit olarak değerlendirilmiştir.

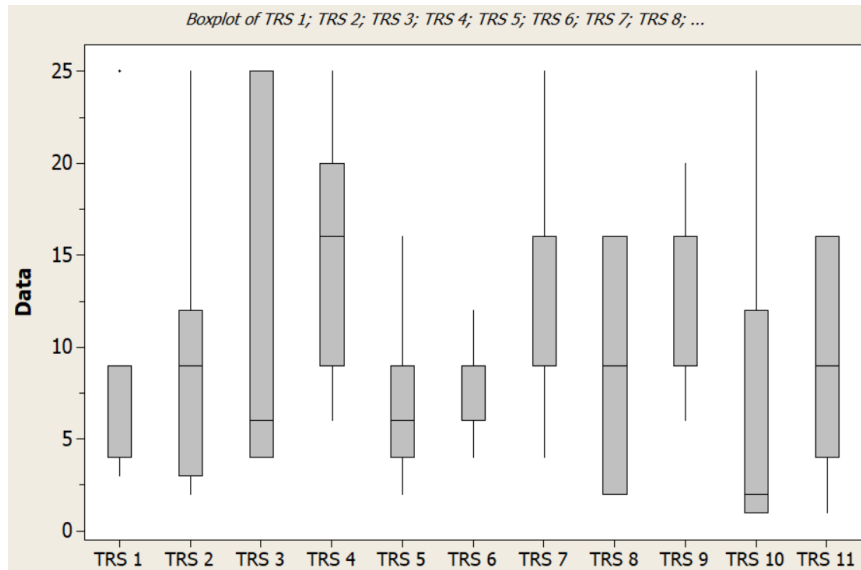
Tablo 4. Tehdit Yanları için Uzman Görüşleri

	U1		U2		U3		U4		U5		U6		U7	
O/S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S
TRS 1	5	5	2	2	3	3	3	3	3	1	3	3	3	2
TRS 2	1	2	3	3	3	3	5	5	4	3	2	2	3	1
TRS 3	5	5	2	2	3	2	3	3	5	5	2	2	2	3
TRS 4	5	5	3	4	3	2	4	4	4	5	4	4	3	3
TRS 5	3	2	2	3	4	4	3	3	2	2	2	2	2	1
TRS 6	4	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	2	3
TRS 7	5	5	4	4	3	3	3	3	3	4	3	3	2	2
TRS 8	2	2	4	4	4	4	3	3	1	2	3	3	2	1
TRS 9	4	4	5	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	2
TRS 10	1	2	1	1	4	3	5	5	1	1	2	2	1	1
TRS 11	3	2	3	3	4	4	4	4	2	2	3	3	1	1

Tablo 5. Tehdit Yanları için Risk Skorları

Tehditler	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	Risk Skor Ort.
TRS 1	25	4	9	9	3	9	6	9,28
TRS 2	2	9	9	25	12	4	3	9,14
TRS 3	25	4	6	9	25	4	6	11,28
TRS 4	25	12	6	16	20	16	9	17,85
TRS 5	6	6	16	9	4	4	2	6,71
TRS 6	12	4	9	9	6	9	6	7,85
TRS 7	25	16	9	9	12	9	4	12
TRS 8	4	16	16	9	2	9	2	7
TRS 9	16	20	16	9	16	9	6	13,14
TRS 10	2	1	12	25	1	4	1	6,57
TRS 11	6	9	16	16	4	9	1	8,71

Tehditler için yapılan uzman değerlendirmeleri sonucunda oluşturul Box-Plot grafiği Şekil 2'deki gibidir. TRS 3 dışındaki risklerin uzmanlar tarafından benzer değerler aldığı görülmektedir. Örneğin, TRS 7 – Veri/Sinyal Kaybı Riski: Sinyal kaybı, gerçek zamanlı bilgi akışını kesintiye uğratarak hem yolcu güvenliği hem de trafik yönetimi üzerinde doğrudan etki yaratır. Uzmanların çoğu bu riski yüksek puanlamış ve bu maddede görece daha az görüş ayrılığı olmuştur.



Şekil 2. Tehditler için Box-Plot Grafiği

Risk Analizi tablosu dikkate alınarak 8 ve üzeri çıkan orta düzeyli ve yüksek düzeyli riskli durumlar için incelemeler sağlanmış ve alınabilecek önlemler sıralanmıştır

Tablo 6’da Risk Skoru yüksek çıkan zayıf yönler ve alınabilecek önlemler sıralanmıştır.

Tablo 6. Zayıf Yönler için Alınabilecek Önlemler

Riskler İçin Alınabilecek Önlemler	
ZRS 1	Ulaşım altyapısını mevcut metro veya tren hatlarına eklemeye yaparak veya diğer ulaşım modlarıyla birleştirilerek güçlendirebilir, zayıf altyapı sistemlerini yenilemek ve daha verimli hale getirmek için kamu ve özel sektörün işbirliği aracılığıyla yeterli finansmanının sağlanması zayıf altyapı sistemlerini güçlendirmeye faydalı olabilir.
ZRS 2	Teknolojilerin yüksek maliyet barındırması, bu teknolojilerin kullanılması yüksek maliyet barındırsada otoyol güvenliği, trafik akışı verimliliği gibi faktörlerin uzun vadeli elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Yazılımın ve ekipmanların millik oranını gerekli eğitimler vererek artırılabilir. Farklı hizmet sağlayıcıların ekipman ve altyapılarını paylaşarak, maliyetleri düşürebiliriz. Örneğin, bir kamera ağı hem trafik yönetimi hem de güvenlik amaçlı kullanılabilir. Yerel kaynakların kullanılması, maliyetleri düşürebilir. Örneğin, yerel sensör üreticileriyle işbirliği yaparak maliyetleri azaltabiliriz.
ZRS 3	Akıllı sensörler ve izleme sistemleriyle ekipmanların uzaktan izlenmesi ve tespisi, bakım süreçlerini optimize edebilir. Bu sayede gereksiz bakım ziyaretleri önlenerek maliyetler düşürülebilir. Veri analitiği ve yapay zeka gibi teknolojiler kullanılarak ekipmanlardaki potansiyel arızalar önceden tahmin edilebilir. Bu sayede planlı bakım işlemleri gerçekleştirilerek sistem kesintileri en aza indirgenir.
ZRS 4	IoT mimarisiyle internet erişimine gereksinim duymadan herhangi bir yerden elde edilen veriye erişim imkanı sunulmasını aynı zamanda birçok zorluğu ortadan kaldırılmasını ve sensörler aracılığıyla elde ettiği verilerin internete aktarılması sayesinde gerçekleştirmiştir. Bu sayede sensör aracılığıyla alınan bir veri internette bulut bilişim içinde korunarak uzaktan analiz imkanı tanımaktadır.
ZRS 5	Sinyalizasyon hesaplamalarının diğer ulaşım modlarıyla entegre edilerek yapılması sağlanabilir. Adaptif trafik kontrol sistemleri trafik yoğunluğunu anlık izleyerek algılayıcı ve sensörler ile otomatik olarak yoğunluk tarafa geçiş üstünlüğü verilmesini sağlar. Hızlı şekilde yanıt vermesi ve dinamik bir şekilde trafiği izlemesi sayesinde uygulanması çözüm niteliğinde olmaktadır. çalışmada, Sinyal optimizasyonu hakkındaki çalışmalarda “adaptif sinyal yönetimi” gelişmiş bir teknik olduğunu belirtmektedir ve ülkemizde de son zamanlarda bu konu hakkında önemli atılımların yapıldığını belirtmiştir.
ZRS 6	İnternet erişimi kesilmesi durumunda yerel olarak verilerin saklanması ve daha sonra senkronize edilmesi sağlanabilir.
ZRS 7	Ulusal düzeyde AUS için standartlar ve kılavuzlar geliştirilerek, sistemlerin daha tutarlı ve uyumlu bir şekilde tasarlanmasına olanak sağlanabilir. Ulusal AUS mimarisi ve standartları sürekli olarak değerlendirilmeli ve güncellenmelidir. Teknolojik gelişmeler ve sektördeki değişiklikler göz önünde bulundurularak, standartlar ve mimari sürekli olarak revize edilmelidir.
ZRS 8	Farklı ulaşım modlarını tek bir platformda entegre ederek, kullanıcıların kolayca farklı ulaşım seçenekleri arasında geçiş yapmasını sağlayan entegrasyon platformları oluşturulabilir. Bu platformlar, bilet satın alma, rota planlama ve seyahat bilgilerini entegre edebilir. Akıllı telefon uygulamaları ve diğer teknolojiler kullanılarak, kullanıcılara gerçek zamanlı ulaşım bilgileri, rota planlama ve bilet satın alma gibi hizmetler sunulabilir. Kullanıcıları farklı ulaşım modlarını kullanmaya teşvik etmek için kampanyalar düzenlenebilir, özel indirimler veya avantajlar sunulabilir.
ZRS 9	Veri paylaşım protokolleri oluşturma. Açık veri politikaları ve uygulamaları.
ZRS 10	AUS alanında staj ve uygulamalı eğitim. AUS konusunda eğitim programları ve kursları düzenleyerek uzmanlaşmış insan kaynağı elde edilebilir.
ZRS 11	Yedekleme kurtarma sistemi kullanılarak verilerin işlenmesi bulut tabanlı yedekleme sistemleri kullanılabilir. Sistem de veri şifreleme teknolojileri kullanılarak dış saldırıların engellenmesini sağlayabilir.

Tablo 7’de Risk Skoru yüksek çıkan tehditler ve alınabilecek önlemler sıralanmıştır.

Tablo 7. Tehdit Yanları için Alınabilecek Önlemler

Riskler İçin Alınabilecek Önlemler	
TRS 1	Trafiği izlemek ve yönetmek için sensörler, kameralar ve veri analizi kullanarak trafik akışını optimize eden sistemler kurulabilir. Bu sistemler, trafik yoğunluğunu azaltabilir ve seyahat sürelerini kısaltabilir.
TRS 2	Farkındalık eğitimleri
TRS 3	Dayanaklı ve su geçirmez tasarım. Montaj ve yer seçimi.
TRS 4	Düzenli denetim yapılması [30]. Ağ saldırı tespit sistemlerinin kullanılması [30].
TRS 6	Tesislere giriş ve çıkışları kontrol altında tutmak için fiziksel erişim kontrolleri uygulanabilir. Bu, yetkisiz kişilerin sisteme fiziksel olarak zarar vermesini engelleyebilir. Periyodik güvenlik denetimleri yapılabilir.
TRS 7	Sinyal güçlendirme ve amplifikasyon. Acil durum planları ve geri kurtarma stratejileri. Yedekli veri ve sinyal yolları.
TRS 9	Ortak yatırımlar ve işbirlikleri. Hibe ve teşviklerden yararlanma. Fazla ve gereksiz ihtiyacı azaltma. Altyapı paylaşımı ve kiralama.
TRS 11	AUS'nin standartlaştırılması

6. Sonuçlar

Hızlı nüfus artışı, alternatif yakıtlara olan ihtiyacın artması, zayıf altyapı, çevreyi etkileyen zararlı gazlar vb etkileri azaltmak için AUS ve servisleri geliştirilmiştir. AUS servislerinin genel amacına baktığımızda ulaşımı yolcular, yayalar, sürücü için daha güvenli ve konforlu hale getirmektir. AUS servisleri teknolojiyle ve özellikle büyük şehirlerde duyulan ihtiyaç ile birlikte büyümekte ve gelişmektedir. AUS servisleri kullanımı ile daha emniyetli yolculuk, kaza ve ölüm oranlarında azalma, enerji verimliliği ve ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır. Yolcu ve sürücü bilgilendirme sistemleri altyapı-araç, araç-araç ağ bağlantılarının tek bir merkezde gerçek zamanlı verilerin toplanmasında bu verilerin beklenen veya beklenmeyen trafik sıkışıklıklarında bilgi vermesi, en uygun rotayı sürücülere sağlaması, yolcuların trafikte kaybettiği süreyi minimize etmesi, kaza oranını minimize etmesine önemli ölçüde etkilemektedir. Elektronik ödeme sistemlerinin kullanımı ile trafikte harcanan sürede ciddi gelişmeler görülmüştür. Akıllı kavşaklar, EGS, HGS, KGS, OGS teknolojileri ile elektronik ortamlarda para transferinin gerçekleştirilmesi, mobilite artması açısından yolculara en etkin ve hızlı hizmet verilmesi sağlanmaktadır. Acil durum yönetim sistemlerinin temel amacına baktığımızda kaza veya acil durum olaylarında olaya müdahale süresini en aza indirerek yaralanma ve ölüm oranını düşürmektir.

AUS'nin genel ve yönlü değerlendirdiğimizde uygulamada karşımıza bazı problem çıkmaktadır. Bu çalışma, Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) üzerine yapılan SWOT analizi ve risk değerlendirmeleri ile AUS uygulamalarının güçlü ve zayıf yönlerini, fırsatlarını ve tehditlerini ortaya koymuştur. AUS servislerinin amacı, ulaşımı daha güvenli, verimli ve çevre dostu hale getirmektir. Çalışmanın sonuçları, AUS'in geliştirilmesiyle elde edilen olumlu etkileri ve karşılaşılan zorlukları vurgulamaktadır.

AUS'in güçlü yönleri arasında, özellikle yük ve filo yönetim sistemlerinin, trafik akışını iyileştirmesi, araçların ve altyapıların zarar görmesini en aza indirmesi, ve düşük enerji tüketimi gibi faktörler bulunmaktadır. Toplu taşıma yönetim sistemlerinin verimliliği artırması ve trafik kurallarının ihlallerini engellemesi de önemli avantajlar arasında yer almaktadır. Ancak, zayıf yönler de belirlenmiş olup, bunlar arasında zayıf altyapı, yüksek teknoloji maliyetleri ve sınırlı sistem kapsama alanı gibi unsurlar ön plana çıkmaktadır. Bunların yanı sıra, uzman görüşlerine dayalı yapılan risk analizleri, çeşitli zayıf yönlerin önemli riskler taşıdığını ortaya koymuştur. Risk analizi sonucunda, zayıf yönlerden kaynaklanan risklerin, altyapı eksikliklerinden (ZRS 1), entegrasyon ve koordinasyon yetersizliğine (ZRS 8, ZRS 9), AUS konusunda uzmanlaşmış insan kaynağı açığının bulunması (ZRS 10) kadar çeşitli alanlarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tehditler kısmında, altyapı maliyetlerinin yüksek olması (TRS 9), veri ve sinyal kaybı riski (TRS 7), ve güvenlik açıkları (TRS 4) gibi tehditler, AUS'in verimli ve güvenli bir şekilde işlemesi için önemli engeller teşkil etmektedir. Bu tehditlere karşı alınması gereken önlemler arasında, acil durum yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, altyapı paylaşımlarının teşvik edilmesi, ve güvenlik protokollerinin sıkılaştırılması önerilmiştir.

Bu bulgular, AUS uygulamalarının daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için belirli önceliklerin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Altyapı ve Teknoloji Yatırımları: Zayıf altyapının iyileştirilmesi ve teknolojilerin yerleştirilmesi, AUS servislerinin uzun vadeli başarısı için kritik öneme sahiptir. Yerel üreticilerle işbirlikleri ve maliyet paylaşımı, bu alandaki ekonomik engelleri aşmak için önerilmektedir. İnsan Kaynağı Gelişimi: AUS alanında uzmanlaşmış insan kaynağı eksikliklerinin giderilmesi amacıyla, eğitim ve uygulamalı staj programları geliştirilmelidir. Risk Yönetimi ve Güvenlik Protokollerinin Güçlendirilmesi: Akıllı ulaşım sistemlerinde güvenlik açıkları ciddi bir tehdit oluşturabilir. Bu nedenle, güvenlik önlemleri ve veri şifreleme teknolojilerinin kullanımı büyük önem taşımaktadır. İntermodal Entegrasyon ve Veri Paylaşımı: Ulaşım sistemlerinin entegrasyonu, daha verimli ve kullanıcı dostu bir AUS hizmeti sunulmasını sağlayacaktır. Bu, özellikle

toplu taşıma ve bireysel ulaşım modları arasındaki geçişi kolaylaştıracaktır. Uygulayıcılar ve karar vericiler için verilen bu öneriler ile uygulama alanları genişletilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, AUS'in güçlendirilmesi, zayıf yönlerinin giderilmesi ve tehditlerin minimize edilmesi için gerekli önlemleri ortaya koymuş ve bu alandaki gelecekteki çalışmalar için önemli bir temel oluşturmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1919B012221312 numaralı 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

- [1] J. A. Jimenez, "Smart transportation systems," in *Smart Cities*, Springer, Cham, pp. 123–133, 2018.
- [2] B. Y. Katanalp, Z. B. Yıldırım, E. Eren, and V. E. Uz, "Akıllı ulaşım sistemleri üzerine bir değerlendirme," in *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, SETSCI Conference Indexing System, vol. 3, pp. 1503–1506, Nov. 2018.
- [3] M. Tektaş, K. Korkmaz, and H. Erdal (2016). "Akıllı ulaşım sistemlerinin geleceği (ekonomik ve çevresel faydaları)." *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 561-577.
- [4] S. Shaheen and R. Finson, "Akıllı ulaşım sistemleri," *UC Berkeley: Ulaşım Sürdürülebilirliği Araştırma Merkezi*, [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/3hh2t4f9>, 2013.
- [5] M. Tektaş and N. Tektaş, "Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) uygulamalarının sektörlere göre dağılımı," *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, vol. 2, no. 1, pp. 32–41, 2019.
- [6] E. B. Meriç, "Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) ve kalkınma ajansları," *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, vol. 1, no. 2, pp. 33–55, 2018.
- [7] H. Korkmaz, "Havalimanı apron emniyeti sorunlarının belirlenmesine yönelik nitel bir çalışma: Akıllı ulaşım sistemleri çözüm önerileri," *Doctoral dissertation, Anadolu University (Turkey)*, p. 24, 2020.
- [8] C. Güven, "Akıllı ulaşım sistemleri üzerine bir sistematik literatür taraması," *Master's thesis, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2019.
- [9] K. N. Qureshi and A. H. Abdullah, "A survey on intelligent transportation systems," *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 15, no. 5, pp. 629–642, 2013.
- [10] S. S. Ateş and H. Korkmaz, "Havalimanı apron emniyeti sorunlarının belirlenmesine yönelik nitel bir çalışma: Akıllı ulaşım sistemleri çözüm önerileri," *Master's thesis, Anadolu Üniversitesi*, 2018.
- [11] UDHB, U. A. U. S. S., "Belgesi (2014-2023) ve eki eylem planı (2014-2016)," *TC Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara*, 2014.
- [12] N. Temurçin and M. Ersoy, "Ağ altyapılarında yapay zeka tabanlı ağ trafik yönetim mekanizmalarının incelenmesi," *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 31–40, 2023.
- [13] M. Yardım and G. Akyıldız, "Akıllı ulaştırma sistemleri ve Türkiye'deki uygulamalar," 2005.
- [14] H. Tufan, "Akıllı ulaşım sistemleri uygulamaları ve Türkiye için bir AUS mimarisi önerisi," *Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, TC Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı*, 2014.
- [15] N. Fidan, A. Karadeniz, and G. Gelışen, "Sürdürülebilir akıllı ulaşım sistemleri yönetimi: Bursa şehri incelemesi," in *2nd International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies (ICENSS-2022)*, May 2022, pp. 26–49.
- [16] BELBİM, *BELBİM İnternet Sitesi*, [Online]. Available: <http://www.belbim.com.tr> [Accessed: May 22, 2014].
- [17] Ö. Abdulkadir, A. Kadir, and K. Çağdaş, "Toplu taşımada akıllı ulaşım sistemlerinin kullanımı: Türkiye'de belediyelerin sunduğu hizmetlerin değerlendirilmesi," *Journal of Transportation and Logistics*, vol. 4, no. 2, pp. 51–64, 2019.
- [18] M. Khan, "Risk analysis of intelligent transportation system investments," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 358–368, 2009.
- [19] M. Zhao, J. Walker, and C. C. Wang, "Challenges and opportunities for securing intelligent transportation systems," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 96–105, 2013.
- [20] O. Krivolapova, "Algorithm for risk assessment in the introduction of intelligent transport systems facilities," *Transportation Research Procedia*, vol. 20, pp. 373–377, 2017.
- [21] G. Sabaliauskaite, J. Cui, L. S. Liew, and F. Zhou, "Integrated safety and cybersecurity risk analysis of cooperative intelligent transport systems," in *2018 Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, pp. 723–728, IEEE, Dec. 2018.
- [22] K. B. Kelarestaghi, M. Foruhandeh, K. Heaslip, and R. Gerdes, "Intelligent transportation system security: Impact-oriented risk assessment of in-vehicle networks," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 91–104, 2019.
- [23] V. Krundyshev and M. Kalinin, "Prevention of cyber attacks in smart manufacturing applying modern neural network methods," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 940, no. 1, p. 012011, IOP Publishing, Sep. 2020.
- [24] İ. Avcı, and M. Koca, "A novel security risk analysis using the ahp method in smart railway systems," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 10, 4243, 2024.

- [25] Jarašūniene, “Analysis of possibilities and proposals of intelligent transport system (ITS) implementation in Lithuania,” *Transport*, vol. 21, no. 4, pp. 245–251, 2006.
- [26] E. Mitsakis, P. Iordanopoulos, G. Aifadopoulou, Y. Tyrinopoulos, and M. Chatziathanasiou, “Current status and future prospects of intelligent transport systems deployment in South East Europe,” 2014.
- [27] C. Namugenyi, S. L. Nimmagadda, and T. Reiners, “Design of a SWOT analysis model and its evaluation in diverse digital business ecosystem contexts,” *Procedia Computer Science*, vol. 159, pp. 1145–1154, 2019.
- [28] M. A. Benzaghta, A. Elwalda, M. M. Mousa, I. Erkan, and M. Rahman, “SWOT analysis applications: An integrative literature review,” *Journal of Global Business Insights*, vol. 6, no. 1, pp. 55–73, 2021.
- [29] M. Oturakci, C. Dagsuyu, and O. Derse, “A new fuzzy approach in risk assessment with process capability for air pollution,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, no. 1, 356-369, 2023.
- [30] İ. Avcı, “Akıllı ulaşım sistemlerinde siber saldırılar ve önlemler,” *Journal of Intelligent Transportation Systems & Applications*, vol. 6, no. 1, 2023.

Greenhouse Gas Emission Estimation and Risk Assessment for Sectors

İkra Rumeysa Aksu ^a, Göker Kurudere ^b, Ayşe Nur Altın ^c, Onur Derse ^{d,1}

^a Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0006-7581-1504

^b Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0009-8851-5060

^c Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0000-0272-1037

^d Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-4528-1999

Abstract

Today, rapid population growth, industrialization, and energy consumption cause a serious increase in global greenhouse gas (GHG) emissions. This increase poses significant threats to environmental sustainability, human health, and ecosystem balance. This study aims to examine Türkiye's greenhouse gas emissions for the period 1990–2021 based on energy, industrial processes and product use (IPPU), agriculture, and waste sectors; to make forward-looking estimates for CO₂, CH₄, and N₂O gases, and to analyze the risks associated with these emissions. In the study, emission estimates were made using Exponential Smoothing and ARIMA models from time series analysis methods. ARIMA (1,1,1) model provided more accurate forecasts with low error rates, and it was observed that the highest increase was in CO₂ emissions, and it was determined that especially the energy sector made the main contribution to this increase. Regular increases were also detected in CH₄ and N₂O gases. Following the estimation results, risk factors for the environmental and social impacts of greenhouse gases were defined. Risk factors were determined by literature review and expert opinions; Health problems caused by CO₂, ecosystem damage, and risks such as access to drinking water have been identified as priority threats. The impact of N₂O on the ozone layer and the consequences of CH₄ on agriculture and livestock are also prominent findings. As a result, it is seen that sectoral greenhouse gas emissions in Türkiye will continue to increase with the current trend, and especially the energy and agriculture sectors play leading roles in this increase. This situation reveals the need for urgent interventions in terms of greenhouse gas control and climate policies at the national level. The study is an important guide for policymakers, environmental planners, and academic researchers in terms of both emission estimation and risk analysis.

Keywords: “Greenhouse gas emissions, ARIMA method, exponential smoothing method, risk analysis.”

1. Giriş

Sanayi Devrimi'nden bu yana fosil yakıtların kullanımının hızlanması ve ormanların hızla tahribatı, sera gazlarında önemli bir artışa neden olmaktadır [1] ve sera gazlarının çevreye salınımı, dünya çapındaki çevresel değişimin arkasındaki ana nedendir [2]. Sera gazları karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), azotdioksit (N₂O) ve daha farklı gazlardan oluşur [3]. Sera gazı emisyonları, insan sağlığı, ekolojik denge ve biyo çeşitlilik üzerinde korkunç sonuçları olacağından, bu ciddi bir endişe kaynağıdır [4]. AB-28 ülkeleri 2014 yılında CO₂ emisyonlarını 1990'a kıyasla %25,7 oranında azaltmayı başarmış ve AB-28 ülkelerinin 2030 yılına kadar CO₂ emisyonlarında %40'lık bir azalma elde etmesi için çalışmalara devam etmektedir [5]. Sera gazı emisyonlarındaki (CO₂, CH₄ ve N₂O) artışın küresel ısınmaya neden olan en önemli faktör olduğu ve doğal kaynakların üç gazın (CO₂, CH₄ ve N₂O) toplam emisyonlarının sırasıyla yaklaşık %96'sını, %46'sını ve %64'ünü oluşturduğu bilinmektedir. İnsanların uygulamaları sonucunda CO₂ akışları, CH₄ ve N₂O ile birlikte karbon döngüsünün doğal dengesini bozar ve yapay bir gezegeni ısıtan küresel sıcaklıkların zorlamasına neden olur. Ayrıca, doğal kaynaklardan gelen ısınmanın neden olduğu sera gazı emisyonları, sürekli bir sıcaklık artışına ve bunun sonucunda ortaya çıkan birçok çevresel soruna neden olmaktadır ve olacaktır [6].

Bu çalışmanın temel argümanı, Türkiye'nin farklı sektörlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının istatistiksel yöntemlerle tahmin edilmesinin, bu emisyonların çevresel etkilerini öngörme ve azaltma stratejilerinin belirlenmesinde kritik rol oynadığıdır. Bu çerçevede çalışmanın temel amacı, hem sektörel bazlı sera gazı emisyon tahminlerini bilimsel yöntemlerle yapmak hem de bu tahminlere dayalı olarak oluşabilecek riskleri belirleyip önerilerde bulunmaktadır. Böylece karar alıcılara emisyon azaltımı konusunda uygulanabilir stratejiler sunulması hedeflenmektedir. Bu çalışma kapsamında ilk olarak sera gazı

¹ Corresponding Author
E-mail Address: onurderse@tarsus.edu.tr

emisyonlarının sektör (enerji bölümü, endüstriyel işlemler ve ürün harcanan sektör, tarım sektörü ve atık sektörü) bazlı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada Üstel Düzeltme yöntemi ve ARIMA metodu kullanılarak sera gazı emisyonlarının (CO_2 , CH_4 ve N_2O) tahmini gerçekleştirilecek olup tahmin sonuçlarındaki değerlerinin incelenmesi ve detaylandırılması ile risklerin belirlenmesi ve önerilerde bulunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem emisyonların gelecekteki eğilimini ortaya koyan bir öngörü çalışması hem de çevresel ve toplumsal risklere karşı alınabilecek önlemleri değerlendiren bütüncül bir çerçevede sunulmaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında amaca yer verilmiş olup ikinci kısımda literatür taraması genişçe gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üçüncü kısmında kullanılacak olan yöntemler tanıtılmıştır ve devam eden kısımlarda uygulamaya ve önerilere yer verilmiştir. Çalışmanın son kısmında ise sonuçlar ve tartışma sunulmuştur.

2. Literatür Taraması

Çalışmada literatür üç başlık altında incelenmiştir. İlk kısımda sektörel incelemeye, ikinci kısımda sera gazı emisyonları ile ilgili yapılan tahminleme çalışmalarına, üçüncü kısımda sera gazı emisyonları ile ilgili gerçekleştirilen risk çalışmalarına yer verilmiştir.

2.1. Sektörel Bazda İnceleme

Sera gazı emisyonu enerji, sanayi, finans, ekonomi, tarım, hayvancılık, ulaşım ve madencilik gibi birçok farklı sektörle ilgilidir. Enerji sektöründeki sera gazı ve hava kirleticilerin kaynaklarının büyük ölçüde aynı olduğu göz önüne alındığında, enerji üretiminin karbondan arındırılması, enerji verimliliğindeki iyileştirmeler ve enerji yapısının değiştirilmesi de dahil olmak üzere temiz enerji teknolojileri portföyündeki yeniliklerin altının çizilmesi gerekmektedir. 1990-2011 yılları aralığında gerçekleştirilen enerji verimliliği ile ilgili çalışmalar, evrensel ölçekte 4 milyar ton petrol eşdeğeri (TEP) tutum ederek öncelikli enerji tüketiminde %32'lik bir azalma sağlamış ve 9,6 milyar ton CO_2 emisyonunun açığa çıkmasını engellemiştir [7]. Erdoğan [8] çalışmasında, son yıllarda fosil yakıtlar yerine geri dönüştürülebilir kaynakların kullanımındaki artış ve enerji sürekliliği çalışmalarının sera gazı emisyonlarındaki artış seviyesinin azalmasında ciddi bir katkı sağladığını belirtmiştir. Sanayide sera gazlarının denetimde tutulması, düşürülmesi ve korunması amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Davarcıoğlu ve Lelik [9] çalışması, eko-verimlilik başlıca yöntemlerden biri olmak üzere, yüksek verimli üretim teknolojilerinin ve tekniklerin kullanımıyla, aynı üretim miktarını elde etmek için az doğal kaynak, enerji harcanması ve daha az atık üretimiyle ilgili bir prensibe dayandığını belirtmektedir. Alper ve Anbar [10] çalışmasında, iklim değişikliğinin, direkt veya başka yollardan etkileyeceği birimlerden birinin de finansal hizmetler sektörü olduğunu belirtmektedir. Romero ve Gramkow [11] çalışmasında, ekonomik karmaşıklık, sera gazı emisyon yoğunluğunun azaltılmasına katkıda bulunur. Ekonomik kalkınma, aynı anda üretim aygıtının modernizasyonuna ve iklim değişikliğinin ve bununla ilgili risklerin hafifletilmesine yol açan yapısal değişikliklere dayanması gerektiği belirtilmektedir. Tarım ve hayvancılık sektörü incelendiğinde, toprağın üç temel sera gazının (CO_2 , CH_4 ve N_2O) kaynağı olduğu söylenebilir. Toprak erozyonunu önlemeye yardımcı olan koruma uygulamaları ile karbon tüketimi dengelenebilir. Mahsul ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde azot yönetilebilir ve N_2O emisyonunu azaltabilir ve su kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenebilir. Şahin ve Önder [12] çalışmasında, atıkların arıtılması açısından düzenli depolama alanında gözlenen yüksek düzeydeki azalma, Avrupa Komisyonunun ortaya koymuş olduğu Atık Çerçeve Direktifi ve Düzenli Depolama Direktifinin ortak bir sonucu olduğunu ve Atık Çerçeve Direktifinin atık önleme ve yönetimi, mevzuat ve politikada öncelik sırası olarak hizmet eden bir atık hiyerarşisi belirlemektedir. İlgili sıralamaya göre listede en son atık bertarafı yer almaktadır. Düzenli Depolama Direktifinin hedefi; atıkların depolanmasının çevre için negatif sonuçlarını ve insan sağlığına yönelik risklerini mümkün olduğunca önlemek veya azaltmaktır. Ahsan ve ark. [13] çalışmasında, ulaşım sektörünün toplam CO_2 emisyonlarının %22'sini oluşturan devasa bir karbon ayak izine sahip olduğunu belirtmektedir. Bu bağlamda, karayolu taşımacılığı, taşımacılık sektöründeki toplam emisyonların en büyük kısmına katkıda bulunmaktadır. En temiz ulaşım şekli olan demiryolu, toplam emisyonların %1'inden biraz daha fazlasına sebep olur.

2.2. Tahminleme Çalışmaları

Gaz emisyonlarının ekonomik yönlerinin ve sonuçlarının incelenmesi, özellikle mevcut artış trendinde hacmi açısından çok önemlidir. Bu nedenle, hava kirliliği emisyonlarının tahmini, benimsenen politikalara doğru yön verebilir. Bu nedenle, gaz emisyonlarının incelenmesi ve tahmin edilmesi gereklidir [14]. Sera gazı emisyonları ile tahminleme çalışması yapan birçok çalışma [15 – 16] bulunmaktadır. Sera gazı emisyonları ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, Köne ve Buke [1] çalışmasında, enerji ile ilgili CO_2 emisyonlarının tahminine yönelik modelleme için trend analizi yaklaşımını kullanmaktadır. Lotfalipour ve ark. [14] çalışmasında, Gri Sistem ve ARIMA yöntemine dayalı CO_2 emisyonlarının tahmini ve iki yöntemin RMSE, MAE ve MAPE metrikleri ile karşılaştırılmasını ele almaktadır. Khan ve ark. [17] çalışmasında, Doğu Asya ve Pasifik, Doğu Avrupa ve Orta Asya, Latin Amerika ve Karayipler'den oluşan farklı ülke grupları için enerji harcanması ve sera gazı emisyonu arasındaki uzun süreli ilişkiyi incelemektedir. Akcan ve ark. [18] çalışmasında Türkiye'deki sera gazı emisyonları enerji sektörü, endüstriyel süreçler sektörü, tarım sektörü ve atık sektörüne göre incelemiştir. Daha sonra sektörler bazında sera gazı emisyonlarını tahmin etmek için Zaman Serisi Analizi modelleri kullanılmıştır. Modellerin performansları ortalama hata,

ortalama mutlak hata ve ortalama karekök hata kullanılarak test edilmektedir. Sonuçlar, tahmin modellerinin farklı sektörler için ulusal sera gazı emisyonlarını makul bir hata içinde tahmin etmek için iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Dritsaki [5] çalışmasında, AB-28'deki CO₂ emisyonlarını tahmin etmek için optimum modeli araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için lineer ARIMA modeli ve ARCH modelinin koşullu varyansı ile birlikte bir otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA) (1,1,1) - otoregresif koşullu değişen varyans (ARCH) (1) modeli kullanılmıştır. Çalışmada son olarak, ARIMA(1,1,1) - ARCH(1) modelini tahmin etmek için hem dinamik hem de statik bir süreç uygulanmıştır. Tahmin sonuçları, statik prosedürün dinamik olana kıyasla daha iyi bir tahmin sağladığını ortaya koymaktadır. Rahman ve ark. [19] çalışmasında, fosil yakıt enerji tüketimi eğiliminin analizini ve üstel düzeltme yöntemi kullanılarak tahmin edilen enerji tüketimini, tahmini ve öngörülen sera gazı emisyonlarının çalışmasını ve sera gazı emisyonlarını etkileyen faktörleri sunmaktadır. Ning ve ark. [20] çalışmasında, 1997'den 2017'ye kadar ki verileri ele alarak dört il için karbon emisyonlarının tahminini ARIMA (p, d, q) modeli ile gerçekleştirmektedir. Model, verileri tahmin etmek ve önümüzdeki üç yıldaki karbon emisyonlarına yönelik eğilimlerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Kour [4] çalışmasında, Güney Afrika'nın 1980'den 2016'ya kadar olan verilerini 2015- 2027 dönemi için CO₂ emisyonlarını tahmin etmek ve ARIMA modeli geliştirmek için kullanılmaktadır. ARIMA modelinin kullanılmasıyla, Güney Afrika'da karbon dioksit emisyonlarının önümüzdeki on yıl içinde sabit bir oranda artacağı tahmin edilmektedir.

2.3. Risk Temelli Çalışmalar

Çevre politikası gelişimi ve yüksek enerji piyasası dalgalanmaları göz önüne alındığında, enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının azaltılması, enerji yoğun tarım firmalarının karlılığını artırabilir ve düzenleyici ve piyasa risklerine maruz kalmasını azaltabilir [17]. Yapılan araştırmalar, ülkelerin enerjide geri dönüşüme ve enerji kullanımının azaltılmasına öncelik vermesi durumunda, sera gazı emisyonlarından kaynaklanan birçok risk faktörünün azalacağını ve özellikle ekonomide olumlu geri dönüşler alabileceklerini göstermektedir. Dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli zorluklardan biri düşük karbon ekonomisine doğru ilerlerken ekonomik büyümeyi desteklemek için artan enerji talebini karşılamaktır. Ayrıca, ekonominin, çevresel ve sosyal sonuçlar arasında dengeyi sağlamak için önlemler alınmadığı takdirde, uzun vadeli sürdürülebilir kalkınmanın tehlikeye girebileceğine dair artan bir endişe vardır [21]. CO₂, CH₄ ve N₂O gazlarının risk durumlarının ve önceliklendirilmesinin yapıldığı çok fazla çalışma olmamakla beraber Smith ve Haigler [22] çalışmasında, sera gazı emisyonlarının olumsuz etkileyeceği alanlardan biri olan sağlıkta risklerin olduğunu öngörmektedir. Çalışmada, enerji sektörü incelenmiş olup başlıca sağlık tehditleri, hava kirliliği, mesleki tehlikeler ve ara sıra meydana gelen büyük ölçekli kaza risklerine değinilmektedir. Verdonck ve ark. [23] çalışmasında, yakın (2031–2050) ve uzak (2081–2100) gelecekte Belçika için kentsel genişleme ve sera gazı emisyon senaryolarının etkisi 100 m mekânsal çözünürlükte değerlendirilmektedir. Plastik yaşam döngüsünden kaynaklanan sera gazı emisyonları, ekolojik çevreyi ciddi şekilde tehdit ettiği ve okyanustaki mikro plastiklerin deniz karbon döngüsü üzerindeki etkisini artırdığı ifade edilmektedir. Akcan [24] çalışmasında Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri ile sera gazı emisyon kaynaklarının risk önceliğini belirlemek için altı sera gazı kaynağı ve üç sera gazı (CO₂, CH₄ ve N₂O) için 25 yıllık veriler dikkate alarak bir inceleme gerçekleştirmiştir. Bunun yanında ultra geliştirilmiş gıdaların tüketiminin azaltılması çevresel sürdürülebilirliği artırma açısından fayda sağlayabilir. Bu gıdaların tüketiminin azaltılması sağlık ve çevrenin korunması için önemlidir [25]. Kırmızı et tüketiminin azaltılması beslenmeden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azalmasına yol açacak ve ölüm, koroner kalp hastalığı ve tip 2 diyabet riskini azaltacaktır [26].

3. Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılması planlanan veriler materyal bölümünde, kullanılması planlanan yöntemler ise metot bölümünde sunulmaktadır. Ele alınması planlanan yöntemler tahminleme için Üstel Düzeltme Yöntemi ve ARIMA yöntemidir.

3.1. Materyal

Çalışmada 1990 – 2020 yılları arasındaki sektör bazlı verilerin kullanılması planlanmaktadır. Ele alınan sektörler enerji sektörü, endüstriyel işler ve ürün tüketim sektörü (IPPU), tarım sektörü ve atık sektörüdür. Tablo 1'de bu dört sektörün CO₂ eşdeğer toplam değerleri ve genel toplam CO₂ eşdeğer değerleri belirtilmektedir. Bu veriler TUIK ((Turkish Statistical Institute), Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2020, National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change) [27]'den sağlanmaktadır.

Tablo 2'de enerji sektörü, endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektörü (IPPU), tarım sektörü ve atık sektörü için CO₂, CH₄, N₂O emisyon miktarları belirtilmektedir. Bu veriler TUIK ((Turkish Statistical Institute), Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2020, National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change) [27]'den sağlanmaktadır.

Tablo 1. Sektör bazlı toplam sera gazı emiyonları miktarı, 1990 – 2020 [27]

Yıl	Enerji	IPPU	Tarım	Atık	Toplam (Mt CO ₂ eş.)
1990	139.6	23.0	46.1	11.1	219.7
1991	144.0	24.9	46.9	11.3	227.1
1992	150.3	24.5	47.0	11.5	233.3
1993	156.8	24.7	47.4	11.8	240.6
1994	153.3	24.3	44.9	12.0	234.6
1995	166.3	25.9	44.1	12.3	248.6
1996	184.0	26.3	44.8	12.7	267.7
1997	196.1	27.1	42.5	13.2	278.9
1998	195.8	27.5	43.7	13.5	280.4
1999	193.8	25.9	44.3	13.9	277.9
2000	216.0	26.3	42.3	14.3	299.0
2001	199.2	25.9	39.9	14.8	279.8
2002	205.9	26.9	37.6	15.2	285.7
2003	220.4	28.3	40.6	15.6	304.9
2004	226.3	30.8	41.3	16.1	314.5
2005	244.4	33.7	42.4	16.4	337.0
2006	260.5	36.7	43.9	16.8	358.0
2007	291.5	39.3	43.4	17.1	391.3
2008	288.3	41.1	41.3	17.2	387.9
2009	292.9	43.0	42.0	17.2	395.1
2010	287.8	49.0	44.4	17.4	398.7
2011	309.9	53.9	46.9	17.8	428.5
2012	321.6	56.2	52.7	17.6	448.0
2013	308.3	59.2	55.9	16.7	440.0
2014	326.8	59.9	56.2	16.5	459.4
2015	342.0	59.2	56.1	17.1	474.5
2016	361.7	63.5	58.9	16.7	500.8
2017	382.4	66.4	63.3	16.3	528.3
2018	374.1	68.0	65.3	16.6	524.0
2019	365.4	58.6	68.0	16.1	508.1
2020	367.6	66.8	73.2	16.4	523.9

Tablo 2. Emisyon kaynaklı seragazı emisyon miktarları, 1990 – 2020 [27]

Emisyon Kaynakları	1990	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
CO ₂	151	229	264	316	384	405	430	422	401	413
Toplam (kt)	665	858	769	036	330	305	220	569	720	433
Enerji	129	204	232	271	330	347	369	360	350	353
	891	494	907	645	815	273	365	850	127	038
IPPU	21	24	31	43	52	56	59	60	50	58
	287	726	237	735	704	734	404	461	302	735
Tarım	460	617	613	645	811	1	1	1	1	1
						295	450	257	288	657
Atık	27	21	12	11	1.1	1.8	1.5	1.2	2.4	3.6
CH ₄	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Toplam (kt)	699	746	806	064	111	222	271	414	525	560
Enerji	310	360	337	490	295	419	355	382	469	434
IPPU	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
Tarım	1	878	882	951	1	1	1	1	1	1
	005				214	219	353	456	503	560
Atık	384	507	587	623	601	584	563	575	553	565
N ₂ O										
Toplam (kt)	84	83	85	92	108	115	119	119	124	136
Enerji	6.5	8.5	10.5	13.3	12.7	13.3	14.0	12.6	12.0	12.4
IPPU	3.6	2.8	2.4	5.5	4.9	4.1	4.2	6.1	6.8	6.7
Tarım	69	66	66	67	84	91	94	93	98	109
Atık	4.9	5.5	5.8	6.3	7.1	7.1	7.3	7.4	7.5	7.6

Tablo 3’de gazlara göre sera gazı emisyon miktarları belirtilmektedir. Bu veriler TUIK [27]’den sağlanmaktadır.

Tablo 3. Gazlara göre sera gazı emisyon miktarları, 1990 – 2021 [27]

Yıl	Toplam	CO2	CH4	N2O
1990	219,5	151,6	42,5	25,0
1991	226,8	158,1	43,4	24,7
1992	233,1	164,1	43,3	25,3
1993	240,8	171,1	43,1	26,0
1994	234,4	167,6	42,8	23,6
1995	248,2	181,4	42,6	23,9
1996	267,6	199,6	43,0	24,5
1997	278,8	212,1	42,2	24,1
1998	280,3	212,1	42,4	25,3
1999	277,8	207,9	43,8	25,6
2000	298,9	229,9	43,7	24,8
2001	279,7	213,6	42,9	22,6
2002	285,6	221,2	41,0	22,6
2003	304,8	236,8	43,0	24,0
2004	314,4	244,8	43,5	24,8
2005	337,6	264,9	45,2	26,0
2006	358,0	282,4	46,6	27,2
2007	391,7	313,7	49,1	26,8
2008	388,5	310,6	50,2	25,4
2009	395,2	316,4	49,9	26,6
2010	398,8	316,2	51,6	27,4
2011	428,6	342,1	54,2	28,5
2012	448,2	356,1	57,8	29,7
2013	440,2	347,3	56,7	31,5
2014	459,5	364,0	58,5	31,7
2015	475,0	384,9	52,8	32,3
2016	501,1	406,0	55,6	34,3
2017	528,6	430,9	56,8	35,4
2018	523,1	422,1	60,4	35,5
2019	508,7	402,7	63,2	37,0
2020	524,0	412,9	63,9	40,5
2021	564,4	452,7	64,0	40,3

3.2. Metot

3.2.1. Üstel Düzeltme Yöntemi

Zaman serisi analiz modelleri, daha önce verileri gözlemlemek ve gelecekteki verileri istatistiksel modeller aracılığıyla tahmin etmek için kullanılan modellerdir. En yaygın olarak kullanılan zaman serisi modellerinden birisi üstel düzeltme yöntemidir. Üstel düzeltme yöntemi Eşitlik 1 ile gösterilir. α düzeltme katsayısını ve t gözlem zamanını temsil eder. F_t , t . zamandaki tahmin değerini A_t ise t . zamandaki gerçek değeri temsil eder. F_{t+1} ise bir sonraki zamandaki tahmini değeri temsil eder [18].

$$F_{t+1} = \alpha A_t + (1 - \alpha)F_t \quad (1)$$

3.2.2. ARIMA Yöntemi

ARIMA modeli, diğer ekonometrik yöntemlere göre daha doğru tahminler verdiği düşünüldüğü için bu çalışma için uygun bulunmuştur [28]. ARIMA modelleri, regresyon modellerinden farklı olarak, zaman serilerinin gecikmeli veya geçmiş değerleri ve stokastik hata terimleri ile açıklanmasına olanak sağlar [29]. ARIMA, bir zaman serisini tahmin etmek için en genel model sınıfıdır. ARIMA modeli $ARIMA(p, d, q)$ ile temsil edilen üç parametrelili bir modeldir. Bu parametreler p , d ve q ’dur [30]. p parametresi AR bileşeninin sırasıdır, d parametresi durağanlık için fark alma derecesidir ve q parametresi ise MA bileşeninin sırasıdır [14].

Tahminleme modellerinde tahmin doğruluğunu hesaplamak için, tahmin edilen sonuçlar üç farklı istatistiksel yöntemle değerlendirilebilir: Ortalama Mutlak Hata (MAE), Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE). Bu istatistiksel hesaplamalar sırasıyla Eşitlik 2, Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'teki gibidir.

$$\text{Ortalama Mutlak Hata (MAE)} \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i| \quad (2)$$

$$\text{Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE)} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE)} \quad MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \quad (4)$$

3.2.3. Risk Analizi

Risk analizi kısmında risklerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi gerçekleştirilmektedir. İncelenen riskleri CO₂, N₂O ve CH₄ kaynaklı olarak ele alınmaktadır ve öneriler sunulmaktadır.

4. Uygulama

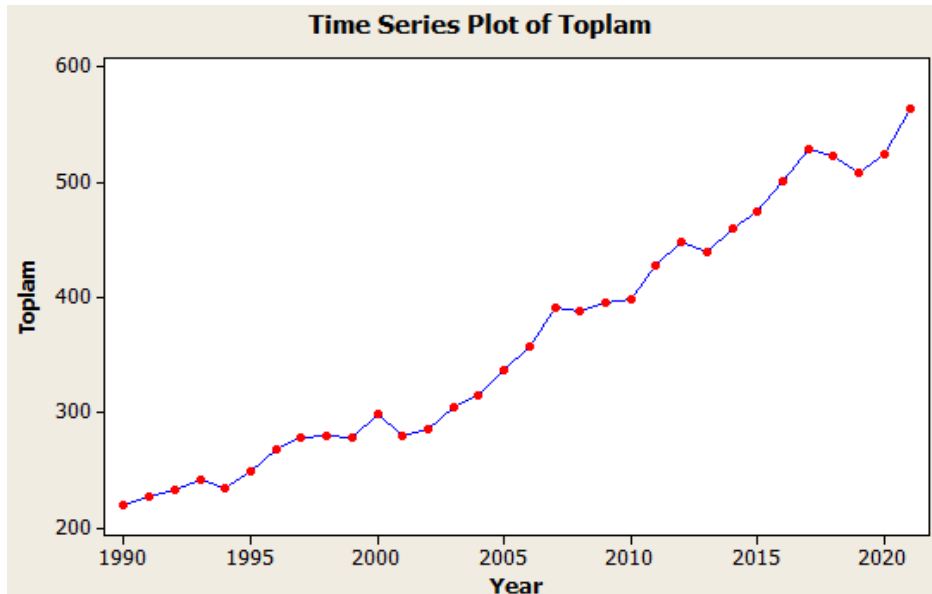
4.1. Tahminleme İçin Uygulama

Üstel düzeltme yöntemini kullanarak CO₂, CH₄, N₂O değerlerini ayrı ayrı hesaplandığında Tablo 5 elde edilmektedir.

Tablo 5. Sera gazı emisyonlarının tahminlemesi

CO ₂ için hesaplamalar	CH ₄ için hesaplamalar	N ₂ O için hesaplamalar
F2021=413.4×(1+0.029)≈424.8	F2021=64.00×(1+0.0142)≈64.90	F2021=40.5×(1+0.097)≈44.44
F2022=424.8×(1+0.029)≈436.8	F2022=64.90×(1+0.0142)≈65.81	F2022=44.44×(1+0.097)≈48.75
F2023=436.8×(1+0.029)≈449.4	F2023=65.81×(1+0.0142)≈66.75	F2023=48.75×(1+0.097)≈53.42
F2024=449.4×(1+0.029)≈462.7	F2024=66.75×(1+0.0142)≈67.72	F2024=53.42×(1+0.097)≈58.49
F2025=462.7×(1+0.029)≈476.8	F2025=67.72×(1+0.0142)≈68.72	F2025=58.49×(1+0.097)≈63.99
F2026=476.8×(1+0.029)≈491.8	F2026=68.72×(1+0.0142)≈69.75	F2026=63.99×(1+0.097)≈69

Ele alınan 1990 – 2021 verileri ile ARIMA metodu uygulandığında öncelikle zaman serisi grafiği oluşturulmuştur ve Şekil 1 elde edilmiştir. Şekilde artan bir ivme göze çarptığı için durağanlık testi uygulanmaktadır.



Şekil 1. Zaman Serisi Grafiği

Farkı alınmış olan seri ACF ve PACF grafikleri incelendiğinde en uygun serinin ARIMA (1,1,1) olduğu görülmektedir. Elde sonuçların Tablo 5’de özeti verilmektedir.

Tablo 5. Üstel düzeltme ve ARIMA yöntemi sonuçları

Yıl	Toplam(Mt, CO ₂ eş.)	
	Üstel ile tahminleme sonuçları	ARIMA ile tahminleme sonuçları
2022	558.9	571,265
2023	554.0	579,233
2024	549.6	588,021
2025	545.6	591,42
2026	542.0	607,272

Üstel düzeltme yöntemi ve ARIMA (1,1,1) yöntemleri için model performans metrikleri Tablo 6’da görüldüğü gibidir. Üstel düzeltme yöntemi, geçmiş verilere oldukça iyi uyum sağlamış ve daha düşük hata değerleri (MAE, RMSE, MAPE) ile yüksek bir açıklama gücü ($R^2 = 0.97$) göstermiştir. ARIMA modeli, daha düşük uyum göstermiştir ($R^2 = 0.85$), ancak bu fark modeli genel olarak kötü yapmaz. Kısa vadeli düz seyirli verilerde SES işe yarayabilir, ancak uzun vadeli tahmin ve genellenebilirlik açısından ARIMA modeli daha güvenilirdir.

Tablo 6. Model performans metrikleri

Yöntem	MAE	RMSE	MAPE (%)	R ²
Üstel Düzeltme Yöntemi	14,98	17,55	3,91	0,9724
ARIMA Yöntemi	18,91	41,38	6,42	0,8467

4.2. Risk Analizi İçin Uygulama

Bu başlık altında risklerin belirlenmesi sunulmaktadır.

Bu kısımda risklerin incelenmesi gerçekleştirilmektedir. İncelenen riskleri CO₂, N₂O ve CH₄ kaynaklı olarak ele alınmaktadır ve daha sonra kapsayıcı riskler elde edilmektedir. Literatür taraması ve uzman görüşü ile oluşturulmaktadır.

CO₂ Kaynaklı Risk Faktörleri

- Sağlık sorunlarının artması [31]
- İçme suyuna erişim [31]
- Sıcaklık artışları
- Ekosistemin bozulmasına bağlı olarak oluşabilecek salgın hastalıklar [31]
- Okyanusların asitlenmesi gibi ekolojik sorunlar [32]
- Sağlık harcamalarının artması [32]
- Biyolojik çeşitliliğin azalması
- Aşırı yağışlar sonucu bitki böceklenmesi, bitki hastalıkları [33]
- Aşırı sıcaklar sonucu kuraklık, bitki verimliliğinin azalması [33]
- Deniz seviyesinin yükselmesi, birçok kıyı şehirlerin sular altında kalması [34]
- Hava durumunun bozulması uğraması

N₂O Kaynaklı Risk Faktörleri

- N₂O’nun gübreleşmiş topraklarda ve zenginleştirilmiş sulardaki verimliliği azaltması [35]
- N₂O emisyonlarının biyoyakıtların genel sera gazı dengesini bozması [36]
- Gübre yönetiminin N₂O’ dengesini bozması
- Oksijen kıtlığı ile karşı karşıya kalan bakterilerin N₂O dan oksijen üretilip atmosferik seviyeleri sınırlandırması [37]
- N₂O stratosferik ozon tahribatına yol açması [38]
- Fosil yakıt içeren yakıtların yakılması durumunda havaya N₂O salınımı olması [39]

CH₄ Kaynaklı Risk Faktörleri

- Hayvancılık etkinlikleri sonucu ortaya çıkan antropojenik sera gazları atmosfere negatif yönde etki ederek iklimi küresel olarak değiştirmesi [40]

- Çiftlik hayvanlarının verimlerinde düşüş, çevre şartlarına zıt uyum sağlamada zorluk ve bu koşullarla alakalı olarak hayvanların refah seviyelerinin düşmesi ile karşı karşıya kalırız [40]
- Tarım ve turizm sektörleri ise iklim değişikliğinin fiziksel etkilerinden olumsuz etkilenmesi [10].
- Sigorta kapsamındaki zararların çok yüksek maliyetlere ulaşabilmesi ve sigorta şirketlerini ve reasürans şirketlerini mali açıdan zor durumda bırakılma olasılığı [10].
- Deniz seviyesi yükselmesi, sıcaklık, buzulların erimesi, sel ve taşkın arıtma tesislerinde olumsuz değişikliklere sebep olmaktadır [41].
- Ekolojik dengeyi tehdit etmesi [42].
- Kömür kökenli CH₄ üretimi; hava kirliliği, gürültü, yeryüzünde oluşacak bozulmalar (çökme vb.), CH₄ ile üretilen atık sular gibi çevresel sorunlara sebep olur [43].

5. Öneriler

Bu kısımda incelenen risklerin CO₂, N₂O ve CH₄ kaynaklı olarak önlemleri incelenmekte ve ele alınmaktadır.

CO₂ Gazının Azaltılmasına Yönelik Öneriler

Dumrul [44] çalışmasında, ASEAN-5 ülkelerinin çoğunda CO₂ emisyonunu düşürmeye yönelik politikaların (çevresel atıkların azaltılması, fosil yakıtlarla alakalı enerji tasarrufunun oluşturulması, enerji verimliliğinin yükseltilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının fazlaştırılması gibi) sağlık ile ilgili yararlar olabileceğini söylemiştir. Örnek olarak, yapılması planlanan yenilenebilir enerji mevduatları, ekonomik büyümeyi olumlu olarak etkileyebilmekle beraber, CO₂ emisyonunun azaltılmasına yol açarak sağlık üzerindeki negatif etkinin düşürülmesine yardımcı olabileceği vurgulanmaktadır. Son zamanlarda FAO, IWMI ve ICID (Birleşmiş Milletler Tarım ve Gıda Teşkilatı, Uluslararası Su Yönetimi Enstitüsü, Uluslararası Sulama ve Drenaj Komisyonu) gibi uluslararası kuruluşlar suyun hiçbir bir damlasının bile israf etmeden etkili kullanılmasının önemini altını çizmiştir ve “her damla suya karşılık daha fazla ürün” ilkesini dikkate almışlardır. Sulamada etkin su kullanımının sağlanması için;

- Fazla su kullanımının önüne geçilmesi,
- İklim değişikliklerinin bitkinin gelişmesine, su harcamasına karşı aksiyonlarının araştırılması,
- Su kalitesinin seviyesini yukarı çıkarmak ve korunması, inceleme ve ele alınması,
- Sulama ile alakalı kurum ve organizasyonlar için ayrımlı iklim senaryoları için su yönetim rehberlerinin yaratılması, sulamanın çevresel etkilerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi,
- Basınçlı sulama yöntemlerine göre sulama düzenlerinin yapılması,
- Alternatif su kaynaklarının (atık suların tekrar geri kazanılması, yüzey sularının suyun az olduğu yerlere yönlendirilmesi, su tasarrufu sağlayan sulama metodu ve tekniklerinin iyileştirilmesi, atık sulardan ve drenaj sularından faydalanma olanakları) geliştirilmesi,
- Su dağıtım kayıplarının minimuma indirilmesi için açık sistemleri gözden çıkararak kapalı borulu sistemlerin daha fazla kullanılması,
- Büyüklük esasına göre bir fiyatlandırma modeli (bitki-alan yerine, su miktarı) yaratılması,
- Kurumların birbiri ile paralel hareket edip, çiftçilerin su tasarrufuyla alakalı bilgilendirilmesi,
- Su kaynaklarının etkili bir şekilde korunması ve kullanılması konusunda detaylı bir su yasasının oluşturulması, gerekmektedir [45].

CO₂ gazının azaltılmasına yönelik diğer öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Ulaşımda fosil yakıt harcayan araçlar yerine daha çevreci hibrid ya da elektrikli sistemle çalışan araçların tercih edilmesi, oldukça yüksek oranda toplu taşıma araçlarıyla seyahat, araç kullanımına bağlı karbon emisyonunu azaltacaktır. İş yerine ulaşımında kişisel araç kullanımı yerine toplu taşıma kullanımı, ulaşım sektörünün sebep olduğu emisyonu önemli derecede azaltacaktır [46].
- CO₂ tutma ve depolama emisyon azaltmak için uygulanabilir. CO₂ tutulup depoya taşınır. Amaç, gazı atmosferden uzak tutmaktır. Bu tekniklerden birinde CO₂'nin hacmi düşürülür. Jeolojik uygulamalarla okyanusa taşınır. Burada minerallerde veya endüstriyel işlemlerde kullanılır [47].
- Aydınlatma, ısıtma, ulaşım ve diğer mekanik ve elektronik cihaz ve sistemlerin zamanında bakımlarının yapılması da sera gazı emisyonunun artmasında engel olacaktır. Bunun dışında aktif olarak kullanılmayan elektrikli ve elektrik ile çalışan cihazların kapalı tutulması, sürekli kullanımda olmayan elektrik tüketimlerinde sistemin sensörlü ya da otomatik mekanizmalarla desteklenmesi elektriğe dayalı karbon emisyonunda da gerekli tasarrufu sağlayacaktır. Elektrik ihtiyacını sağlaması amacıyla güneş enerjisi panelleri, rüzgâr enerjisi panelleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin kurularak elektrik enerjisi sistemine dahil edilmesi elektriğe bağlı karbon emisyonunu azaltacaktır [46].

- Ekonomik uygulamalarda ağaç dikme alınması gereken önlemlerdendir. Fabrikalarda özel alg üretimi de ilgi çekmektedir. Algler CO₂ emisyonlarının tutulmasında dikkat çekmektedir [48].
- Belirtilen bütün öneriler karbon emisyonunun azaltılmasının gerçekleşmesi amacıyla yapılması gereken aktivitelerdir. Bahsedilen önlemler sera gazı emisyonunu belli ölçüde azaltsa da yetersiz kalabilir. Alternatif önlemler karbon yutakları kurmak, karbonu ihraç etmek ya da son yıllarda gündeme hızla yerleşen karbon rezervuarlarına hapsedmek şeklinde ortaya çıkmaktadır [46].
- Yakıt tüketiminde emisyon azaltıcı faktörler dikkate alınmalıdır. Yenilebilir olmayan yakıtlar olabildiğince kullanılmamalıdır. Bunun için motor ile egzoz tipi değiştirilmelidir [49].
- Kimyasal gübre yerine fermente gübre tercih edilmelidir. İçeriğinde kompost, biyoçar vb. organik malzemeler bulunmaktadır. Bu sayede toprak da daha verimli hale gelir [50].
- Sürdürülebilir tarım daha çok yaygınlaştırılabilir. Su kirliliğini azaltmak, toprağın üretkenliğini korumak hedeflenir. Tarımsal biyoçeşitlilik de gözetilir. Ek olarak ekonomik sürdürülebilirlik sağlanması da hedeflenebilir [50].

N₂O Gazının Azaltılmasına Yönelik Öneriler

- Küresel ısınmayı önleyebilmek için enerji, sanayi, ulaşım ve tarım sektörlerinde, başta fosil yakıt kullanımının azaltılması yoluyla, gerekli politika değişikliklerine gidilerek sera gazı üretimi sınırlandırılabilir [51].
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha çok kullanılabilir. Enerji sektöründe bunun üzerine faaliyetlerde bulunulabilir [51].
- Ormanlar koruma altına alınabilir [51].Bilinçli tarımsal uygulamalar arttırılabilir. Gübreleme ve ilaçlama gibi çalışmalar örnek verilebilir [51].
- Önemli yaptırımlardan biri olan vergiler, emisyonun düşürülmesi için uygulanabilir [51].
- Gemi emisyonlarının düşürülmesine yönelik ileriye dönük çözüm olabilmesi için, gemilerde geniş çapta kullanılan fosil yakıtlara seçenек enerji kaynağı olarak ilerleyen teknoloji ile beraber daha az zarar verici etkisi olan LNG, LPG, güneş enerjisi, elektrik ve hidrojen ile çalışan gemi makineleri ilerletilmelidir. Ortaya konan bu makinelerin başta gemi inşa sanayinde teşvik edilmesi ve geliştirilmesi güçlü devletler katkısıyla da destek verilmelidir [52].
- Sera gazları emisyonlarının düşürülmesi için alınacak bazı önlemlerden biri yerin altındaki zenginliklere yönelmektir. Sürdürülebilir bir gelecek için Türkiye'nin yeraltı kaynakları olan toryum, uranyum, asfaltit, ham petrol, doğalgaz gibi fosil yakıt rezervleri ile birlikte biyokütle ,hidrolik, rüzgar ve güneş enerjisi gibi alternatifler kullanılmalıdır. Bu kaynaklar çevresel etkilerin azaltılmasına ve enerji güvenliğinin artmasında önemli rol oynayacaktır [47].
- 2019 yılı Eylül ayında Türkiye'nin Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne sunmuş olduğu 7. Ulusal Bildirimde, sera gazı emisyonu azaltma politikalarına yönelik karayolu taşımacılığı çerçevesinde planlanmış ulusal katkıları aşağıdaki şekilde kararlaştırılmıştır;
- Ulaşım ve mal lojistiğinde karayolu kullanımını düşürerek, alternatif yollarla taşınmasıyla birlikte taşıma modları arasında dengeli bir şekilde kullanılması,
- Fazla alternatifli ulaşım ve lojistiğin fazlalaştırılması
- Sürdürülebilir yöntemleri (yeşil lojistik) kentsel lojistik kapsamında hayata geçirmek,
- Düşük emisyonlu araçlar ve alternatif yakıt kaynaklarının desteklenmesi,
- Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi (2014-2023) ve Eylem Planı (2014-2016) ile fosil yakıt tüketimini ve karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonları azaltmayı amaçlamaktadır,
- Eskimiş araçların kullanımının sonlandırılmasıdır [53].
- Karayolu kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması için emisyon düşürücü önlemler dışında en önemli çalışmalardan biri de alt yapı çalışmalarıdır. Bunun yanı sıra emisyonun hacmi yönünden taşıma şekillerinin tutumlu olacak şekilde uygulanması ve kombine taşımacılığın fazlalaştırılması kaçınılmazdır. Bu maksatla imkan oldukça tren ile sağlanacak olan lojistiğin çoğaltılması temin edecek elektrikli alt yapı ve duble demiryolları çalışmaların gerçekleştirilmesi önemlidir [53].

CH₄ Gazının Azaltılmasına Yönelik Öneriler

- Çiftlik hayvanlarının verimlerini artırmak ve aynı sayıda ürünü yapabilmek için daha az hayvan ve/veya daha az yaşama süresi olan hayvanlar yetiştirilmelidir. Azaltma durumu, sera gazı emisyonlarını azaltımının yanı sıra kârı artırabilir. Sera gazı emisyonlarının düşürülmesiyle hayvan refahını dengeleyen bir strateji olarak, beslenme gereksinimlerini karşılamak için kapalı yetiştirme sistemleri ile açık alana etkileşimi birleştiren karma sistemlerin uygulanması önemlidir [40].
- Enerji sektöründe dışa bağımlılığı azaltacak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kendi kendini yenileme özelliğinden ödün vermeyecek şekilde sürdürülebilir kullanımını destekleyecek devlet politikaları geliştirilmelidir. Enerji tüketimini etkileyen diğer ilişkili sektörlerdeki enerji kullanım oranlarını azaltacak şekilde güneş, rüzgâr, termal enerji, hidroenerji ve biyogaz gibi çevre dostu yenilenebilir enerji türlerinin kullanımı desteklenmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminin sağlandığı tesislerin teşvik edileceği uygun vergilendirme ve maliyetlerin belirlenmesi ile çevreye daha duyarlı şekilde enerji üretimi sağlanmalıdır. Özellikle sanayi üretiminde yerli hammadde kullanımı ile sektörler bazında yerli üretimin teşvik edilmesi sağlanmalı, dışa bağımlılık ve

hammadde-nihai ürün üretim, depolama, ulaştırma süreçlerindeki emisyon üretimleri en aza indirilmelidir. Ulaşım sektöründe hem kentsel ulaşım da hem de yük taşımacılığında özellikle fosil yakıt kullanımına dayalı emisyon üretiminin en yoğun yaşandığı karayolu odaklı ulaşım anlayışı, demiryolu ve su yolu odaklı şekilde geliştirilmelidir [12].

- Emisyonların geneli arazi kullanımı değişikliğinden ya da ineklerden kaynaklanan CH₄ emisyonları gübre yönetimi ve gübre kullanımı gibi çiftlik düzeyindeki emisyonlardan kaynaklanır. Tümüyle kesmediğiniz sürece, daha az et ve süt ürünleri harcamak, karbon ayak izinin üzerinde yerel olarak yemek yemekten daha büyük bir etki sağlar [54].
- Hayvancılıkta CH₄ üretimini düşürmek için kullanılabilecek yöntemlerden biri, besin katkı maddelerinin seçilmesidir. Hayvanların neden olduğu CH₄ gazı üretiminin başka bir faktörü olan hayvan dışkıları, öncelikli olarak biyogazın ortaya çıkması için oldukça elverişli hammaddeler olarak kabul edilmektedir. Avrupa Birliği üye ülkeleri önderliğinde dünya genelinde pek çok ülke, hayvanların dışkılarından anaerobik arıtma yöntemiyle biyogaz üretimi bakımından başarı elde etmiştir [55].
- Tarımsal uygulamalarda sera gazının ortaya çıkmasına sebep olan bir başka olumsuzluk da anız yakma olayı ise üreticilerin bilgilendirilmesi ve anayasaya uygun şekilde çözülebilecek olumsuzluklar çevresinde bulunur. Geçerli yasal düzenlemelerin uygulanmasını sağlamak ve üreticileri bu konuda bilgilendirmek, anız yakmanın neden olduğu sera gazı emisyonunu azaltmak için alınabilecek önlemler arasında sayılabilir [55].
- CH₄ gazı, elektrik ve ısı enerjisi üretimi için mühim bir kaynaktır. CH₄ gazının enerji üretirken kullanılmasının diğer faydası, fosil kaynakların kullanımıyla salınan gazların da azaltılmasını sağlamasıdır [42].
- Toprakların ideal ve etkin kullanılarak, organik karbon meydana gelmesinin ve tutulmasının artırılması; bazı problemlerin ortadan kalkması için faydalı olabilir [51].
- Tarım sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarını azaltmak için kimyasal gübre kullanımının kontrol edilmesi, kırsal üreticilerin bilgilendirilmesi ve cezaların uygulanması gerekmektedir. Hayvancılıkta daha üretken yem bitkileri kullanarak enterik fermentasyonu düzenlemek, CH₄ emisyonlarını düşürme amaçlı bir yöntem olarak tavsiye edilmektedir [56].
- Emisyonların havanın kalite düzeyinde yaratabileceği negatif sonuçların en aza indirmeyi amaçlayan teknolojik süreçler yaratılabilir [57].
- Uçaklar iklim için ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Bunun sebebi LTO, seyir kademeleri olarak değerlendirilebilir. Bunun önüne geçebilmek için teknolojik stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Emisyonların hava kalitesine etkileri önceden değerlendirilerek göz önünde bulundurulmalıdır. Deneysel çalışmalarla doğru olarak hesaplanabilir. Böylece emisyon miktarlarının tahmini daha verimli sonuç verecektir [57].

Ayrıca, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları ağırlıklı olarak karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) formunda ortaya çıkar. Bu emisyonların azaltılmasına yönelik inovatif arıtma teknikleri, her üç gazı da doğrudan veya dolaylı yoldan hedef alabilecek potansiyele sahiptir. Mikroalgal sistemler, atmosferden veya proses kaynaklı salınan CO₂'yi fotosentez yoluyla organik karbon formuna dönüştürerek doğrudan CO₂ emisyonlarını azaltabilir. Bu sistemler aynı zamanda dış kaynaklı enerji ihtiyacını azaltarak, dolaylı CO₂ salımını da düşürür. Ayrıca, elde edilen alg biyokütlesi enerji üretiminde kullanılabilir, bu da fosil yakıt bağımlılığını azaltarak CO₂ kaynaklı toplam karbon ayak izini küçültür. Metan emisyonları genellikle anaerobik süreçlerden ve çamur çürütücülerden kaynaklanır. Nitrite bağımlı anaerobik metan oksidasyonu (n-DAMO) gibi gelişmiş biyolojik süreçler, bu metanı enerjiye dönüştürmeden önce arıtım sürecinde oksitleyerek atmosfere karışmasını önleyebilir. Böylece, doğrudan CH₄ salımı önemli ölçüde azaltılmış olur. Bu, hem çevresel riskleri düşürür hem de metanın enerji kaynağı olarak değerlendirilmesini mümkün kılar. N₂O genellikle azot giderimi sırasında, özellikle dengesiz ya da verimsiz nitrifikasyon-denitrifikasyon süreçlerinden kaynaklanır. Mikroalgal sistemler ve n-DAMO gibi stabil biyolojik süreçler, azot giderimini daha kontrollü bir şekilde gerçekleştirerek N₂O oluşumunu sınırlar. Ayrıca biyokömür uygulamaları, mikrobiyal ortamı dengeleyerek ve azot dönüşüm reaksiyonlarını stabilize ederek N₂O salımını dolaylı olarak azaltabilir. Sonuç olarak, mikroalg sistemleri, n-DAMO süreçleri ve biyokömür uygulamaları; CO₂, CH₄ ve N₂O'nun salımını aynı anda azaltabilecek potansiyele sahiptir. Bu sistemlerin arıtma tesislerinde yaygınlaştırılması, yalnızca çevresel etkilerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda enerji verimliliği, proses optimizasyonu ve sürdürülebilir işletme modelleri geliştirilmesi bakımından da stratejik öneme sahiptir [41]. Gülhan ve ark. [58] çalışmasında CO₂, CH₄ ve N₂O için tahminleme gerçekleştirmiş ve gelişen arıtma teknolojilerinin net emisyonu azalttığını ancak aynı zamanda kaçak olarak salınan CH₄ emisyonunu artırdığı sonucuna varmakta ve nitrifikasyon ve denitrifikasyon verimini etkileyen oranının ve azot giderim veriminin artmasıyla N₂O emisyonunun azalacağı tespit etmektedir. Bir başka öneri olarak, Yapıcıoğlu ve Demir [59] çalışmalarında, atıksu arıtma tesislerinin olumsuz çevresel etkilerini azaltmak amacıyla çevresel performansı belirleyen yeni bir gösterge olan Yeşil Endeks geliştirilmiştir. CO₂ ve N₂O emisyon değerlerinin Yeşil Endeksi, belediye atıksu arıtma tesisine göre sırasıyla 1,13 ve 1,36 değerleriyle daha düşük bulunmuştur.

6. Tartışma ve Sonuçlar

Küresel ısınmanın temel nedeni, enerji gereksinimlerinin sağlanabilmesi için fosil yakıtlı kaynakların sürekli olarak kullanılmasıyla doğal dengenin bozulmasıdır ve küresel ısınma canlıların yaşam için en önemli çevresel sorundur. Atmosfer içerisinde bulunan doğal sera gazlarının yoğunluğunu artırmaktadır. CO₂ gazının doğal konsantrasyonunda artış, sera gazı emisyonlarının %80'in üzerindeki payıyla, doğal dengeyi bozan bir durumu işaret etmektedir. Bu durum, atmosferdeki CO₂ ve

diğer sera gazlarının payının kontrol altına alınmasının, küresel ısınma ve iklim değişikliği açısından büyük önem taşıdığını vurgulamaktadır. IPCC'nin 2007 senesinde yazılan Dördüncü Değerlendirme Raporu, dünya genelinde sıcaklıkların yükseldiğini ve buzulların eridiğini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca, 1959'dan bu yana atmosferdeki CO₂ seviyelerinin sürekli arttığı gözlemlenmektedir. CO₂ düzeylerindeki bu artışla birlikte, dünya genelinde sıcaklık artışları yaşanmaktadır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından 2007 yılında yayımlanan Dördüncü Değerlendirme Raporu'na göre, küresel ısınma sonucu Dünyanın yarısında buzulların azaldığı ve denizlerin sıcaklıklarının fazlaştığı gözlenmiştir. IPCC'nin Üçüncü Değerlendirme Raporu (TAR) ise hiçbir teknoloji seçeneğinin tek başına stabilizasyon sağlamak için gerekli emisyon indirimlerinin tümünü gerçekleştiremeyeceğini, ancak yine de önlem amaçlı tedbirlerin alınması gerektiğini belirtmektedir. Küresel ısınmaya yol açan CO₂ emisyonunu kontrol altına almak için Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü'nde değerlendirilen çevre tutumlarına istinaden, Dünya genelinde çevresel iş birliğinin sağlanması ve toplanan karbon vergisi gelirleriyle temiz teknoloji gelişiminin teşvik edilmesi gerekmektedir. Bu üç bileşenin eşzamanlı olarak uygulanması durumunda, birbirini tamamlayarak küresel ısınmanın önlenmesine yönelik etkili bir politika oluşturulabileceği ve risklerin en aza indirilebileceği ifade edilmektedir.

Çalışmada sera gazı emisyonları enerji, endüstriyel işlemler ve ürünlerden fayda sağlama, tarım ve atık sektörleri kapsamında incelenmekte olup gelecek dönemlerde oluşabilecek sera gazı emisyonu miktarı tahminlenmektedir. Çalışmada 1990 – 2021 yılları arasındaki sektör bazlı verileri Zaman Serisi Analizi yöntemlerinden Üstel Düzeltme Yöntemi ve ARIMA yönetimi kullanılarak tahminlemesi yapılmaktadır ve günümüzde oluşan risklerin CO₂, CH₄ ve N₂O artışlarıyla daha da artacağı görülmektedir. Çalışmada toplam CO₂, CH₄ ve N₂O emisyon değerlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ve bunlara bağlı ortaya çıkabilecek risk durumlarının incelenmesi ve önerilerin oluşturulması gerçekleştirilmektedir. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Türkiye'nin sera gazı emisyonları 1990–2021 yılları arasında artış eğilimi göstermektedir ve bu eğilim, her iki tahminleme modeliyle tahmin edilmektedir.
- CO₂ emisyonları özellikle enerji sektöründen kaynaklı olarak en yüksek paya sahiptir ve çevresel risk açısından önceliklidir.
- CH₄ ve N₂O emisyonları ise tarım ve atık sektörleriyle ilişkilidir ve özellikle tarımsal uygulamalarla doğrudan ilişkilidir.
- Yapılan risk değerlendirme, CO₂'nin sağlık ve çevre üzerindeki etkilerinin daha yüksek öncelikli olduğunu göstermektedir.

Çalışma sera gazı emisyonlarının incelenmesi ve sonucunda risk durumlarına göre ele alınarak ilerideki çalışmalar ve uygulayıcılar için yararlı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1919B012221351 numaralı 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

- [1] Ç. Köne and T. Büke, "Forecasting of CO₂ emissions from fuel combustion using trend analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2906–2915, 2010.
- [2] Gowrisankar et al., "Greenhouse gas emissions: A rapid submerge of the world," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 32, no. 6, p. 061104, 2022.
- [3] D. P. Singh and N. S. Maurya, "A comparative study of the various methodologies for estimation of greenhouse gas emission from wastewater treatment systems," *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 32, no. 3, p. 1373, 2016.
- [4] M. Kour, "Modelling and forecasting of carbon-dioxide emissions in South Africa by using ARIMA model," *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp. 1–8, 2022.
- [5] M. Dritsaki, "Forecasting European Union CO₂ emissions using autoregressive integrated moving average-autoregressive conditional heteroscedasticity models," *670216917*, pp. 411–423, 2020.
- [6] U. Mander, K. Sohar, J. Tournabize, and J. Parn, "Risk analysis of global warming-induced greenhouse gas emissions from natural sources," *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 181–192, 2016.
- [7] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, *Enerji Raporu 2013*, Ankara, 2013.
- [8] S. Erdoğan, "Enerji, çevre ve sera gazları," *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 277–303, 2020.
- [9] B. Davarçioğlu and A. Lelik, "Sanayide iklim değişikliğine uyum ve eko-verimlilik (temiz üretim) programı: Örnek uygulamalar," *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, vol. 6, no. 2, pp. 94–105, 2017.
- [10] D. Alper and A. Anbar, "İklim değişikliğinin finansal hizmet sektörüne etkileri," *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 7, no. 23, pp. 223–253, 2008.
- [11] J. P. Romero and C. Gramkow, "Economic complexity and greenhouse gas emissions," *World Development*, vol. 139, p. 105317, 2021.

- [12] G. Şahin and H. G. Önder, "Atık yönetimi, sera gazı emisyonları ve Türkiye: Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme," *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, pp. 194–216, 2021.
- [13] N. Ahsan, K. Hewage, F. Razi, S. A. Hussain, and R. Sadiq, "A critical review of sustainable rail technologies based on environmental, economic, social, and technical perspectives to achieve net zero emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 185, p. 113621, 2023.
- [14] M. R. Lotfalipour, M. A. Falahi, and M. Bastam, "Prediction of CO₂ emissions in Iran using grey and ARIMA models," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 3, no. 3, pp. 229–237, 2013.
- [15] M. Sun, Y. Yuan, J. Zhang, R. Wang, and Y. Wang, "Greenhouse gas emissions estimation and ways to mitigate emissions in the Yellow River Delta High-efficient Eco-economic Zone, China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 81, pp. 89–102, 2014.
- [16] M. E. Javanmard and S. F. Ghaderi, "A hybrid model with applying machine learning algorithms and optimization model to forecast greenhouse gas emissions with energy market data," *Sustainable Cities and Society*, vol. 82, p. 103886, 2022.
- [17] M. A. Khan, M. Z. Khan, K. Zaman, and L. Naz, "Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 336–344, 2014.
- [18] S. Akcan, Y. Kuvvetli, and H. Kocyigit, "Time series analysis models for estimation of greenhouse gas emitted by different sectors in Turkey," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 522–533, 2018.
- [19] S. M. Rahman, A. N. Khondaker, M. A. Hasan, and I. Reza, "Greenhouse gas emissions from road transportation in Saudi Arabia—a challenging frontier," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 812–821, 2017.
- [20] L. Ning, L. Pei, and F. Li, "Forecast of China's carbon emissions based on ARIMA method," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2021, 2021.
- [21] K. Kaygusuz, "Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions for sustainable development in Turkey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 1, pp. 253–270, 2009.
- [22] K. R. Smith and E. Haigler, "Co-benefits of climate mitigation and health protection in energy systems: Scoping methods," *Annual Review of Public Health*, vol. 29, pp. 11–25, 2008.
- [23] M. L. Verdonck, M. Demuzere, H. Hooyberghs, F. Priem, and F. Van Coillie, "Heat risk assessment for the Brussels capital region under different urban planning and greenhouse gas emission scenarios," *Journal of Environmental Management*, vol. 249, p. 109210, 2019.
- [24] S. Akcan, "A hybrid approach to identify the risk priority of sources of greenhouse gases," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 17–25, 2020.
- [25] S. García et al., "Ultra-processed foods consumption as a promoting factor of greenhouse gas emissions, water, energy, and land use: A longitudinal assessment," *Science of the Total Environment*, vol. 891, p. 164417, 2023.
- [26] C. A. González et al., "Greenhouse gases emissions from the diet and risk of death and chronic diseases in the EPIC-Spain cohort," *European Journal of Public Health*, vol. 31, no. 1, pp. 130–135, 2021.
- [27] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), "Resmi İstatistikler ve Veri Portalı," [Online]. Available: <https://www.tuik.gov.tr/>. [Accessed: 24-Kasım-2024].
- [28] T. Nyoni and W. G. Bonga, "Prediction of CO₂ emissions in India using ARIMA models," *DRJ-Journal of Economics & Finance*, vol. 4, no. 2, pp. 1–10, 2019.
- [29] Rahman and M. M. Hasan, "Modeling and forecasting of carbon dioxide emissions in Bangladesh using Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) models," *Open Journal of Statistics*, vol. 7, no. 4, pp. 560–566, 2017.
- [30] O. Derse, "CO₂ capture, utilization, and storage (CCUS) storage site selection using DEMATEL-based Grey Relational Analysis and evaluation of carbon emissions with the ARIMA method," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1–12, 2022.
- [31] K. Remoundou and P. Koundouri, "Environmental effects on public health: An economic perspective," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 6, no. 8, pp. 2160–2178, 2009.
- [32] C. Erden and F. Turan Koyuncu, "Kalkınma ve çevresel sağlık riskleri: Türkiye için ekonometrik bir analiz," *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 9–23, 2014.
- [33] N. H. Bayraç and E. Doğan, "Türkiye'de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 23–48, Apr. 2016.
- [34] Y. S. Gökten, E. Koçak, and K. Gökten, "Antroposen krizini aşmak: CO₂ emisyonunu etkileyen değişkenler üzerine bir panel veri analizi," *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 13, no. 26, pp. 1013–1035, 2022.
- [35] U. Skiba et al., "UK emissions of the greenhouse gas nitrous oxide," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 367, no. 1593, pp. 1175–1185, 2012.
- [36] E. M. Smeets, L. F. Bouwman, E. Stehfest, D. P. Van Vuuren, and A. Postuma, "Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels," *Global Change Biology*, vol. 15, no. 1, pp. 1–23, 2009.
- [37] D. Richardson, H. Felgate, N. Watmough, A. Thomson, and E. Baggs, "Mitigating release of the potent greenhouse gas N₂O from the nitrogen cycle—could enzymic regulation hold the key?" *Trends in Biotechnology*, vol. 27, no. 7, pp. 388–397, 2009.
- [38] S. J. Del Grosso, T. Wirth, S. M. Ogle, and W. J. Parton, "Tarımsal azot oksit emisyonlarının tahmin edilmesi," *EOS, İşlemler Amerikan Jeofizik Birliği*, vol. 89, no. 51, p. 529, 2008.
- [39] J. Bogner et al., "Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report," *Waste Management & Research*, vol. 26, no. 1, pp. 11–32, 2008.

- [40] B. Akça and S. O. Yetişgin, “Hayvansal üretim sistemlerinde sera gazı emisyonlarının etkisini hafifletmeye yönelik öneriler,” *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 987–993, 2023.
- [41] P. Yapıcıoğlu and Ö. Demir, “Atıksu arıtma tesisleri için iklim değişikliğine ve sera etkisine genel bir bakış,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 22, no. 3, pp. 235–250, 2017.
- [42] S. Ö. Çabuk, “Küresel ısınmaya yol açan sera gazı emisyonlarındaki artış ile mücadelede iktisadi araçların rolünün değerlendirilmesi: Enerji sektörü örneği,” 2011.
- [43] İ. Karakurt, G. Aydın, and S. Kaya, “Kömür kökenli metan üretiminden kaynaklanan çevresel problemler,” *Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu*, pp. 133–140, 2015.
- [44] Y. Dumrul, “Sağlık harcamaları ve çevre kirliliği: ASEAN-5 ülkeleri üzerine bir panel veri analizi,” *IBAD Sosyal Bilimler Dergisi*, pp. 396–407, 2019.
- [45] B. Çakmak and Z. Gökalp, “İklim değişikliği ve etkin su kullanımı,” *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, no. 1, pp. 87–95, 2011.
- [46] Üreden and S. Özden, “Kurumsal karbon ayak izi nasıl hesaplanır: Teorik bir çalışma,” *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 98–108, 2018.
- [47] E. Ü. Deveci, “Termik santrallerin MRV sistemi sera gazı emisyon hesabı ve emisyonların iyileştirilmesi,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 22, no. 4, pp. 199–214, 2019.
- [48] S. Çalışkan Eleren and B. Öner, “Sürdürülebilir ve çevre dostu biyoyakıt hammaddesi: Mikroalgler,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 25, no. 3, pp. 304–319, 2019.
- [49] N. Akgerman and İ. Topçu, “Binek otomobillerde CO₂ emisyon miktarının azaltılmasına yönelik stratejilerin değerlendirilmesi,” *İTÜDERGİSİ/d*, vol. 10, no. 2, 2011.
- [50] E. Gödekmerdan, B. Baştabak, and H. Sarptaş, “Sınırdaki karbon düzenleme mekanizması ve Türkiye’de tarımın geleceği: Fermente gübre, kompost ve biyoçar perspektifi,” *Yeşil Ekonomi: Araştırmacılar Konferansı Tam Bildiri Metinleri Kitapçığı*, pp. 7–19.
- [51] K. Korkmaz, “Küresel ısınma ve tarımsal uygulamalara etkisi,” *Alatarım Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 43–49, 2007.
- [52] Ö. Aygül and S. Baştuğ, “Deniz taşımacılığı kaynaklı hava kirliliği ve insan sağlığına etkisi,” *Journal of Maritime Transport and Logistics*, vol. 1, no. 1, pp. 26–40, 2020.
- [53] O. Dündar and A. Kolay, “Karayolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun hesaplanması,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 14, no. 1, pp. 317–334, 2021.
- [54] M. Türker, A. Berk, and H. Öztürk, “Tarım ürünlerinin karbon ayak izinin azaltılması,” *Proceedings of the 4th International Sustainable Development Congress*, pp. 481–491.
- [55] G. Şahin and A. O. Avcıoğlu, “Tarımsal üretimde sera gazları ve karbon ayak izi,” *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, vol. 12, no. 3, pp. 157–162, 2016.
- [56] D. H. Kalonya, “İklim değişikliği azaltım ve uyum süreçlerinde mera alanlarının önemi,” *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 128–157, 2022.
- [57] N. Babaoğlu and K. Özgünoğlu, “Kahramanmaraş havalimanı için uçaklardan kaynaklanan emisyonların belirlenmesi,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 20, no. 3, pp. 24–30, 2017.
- [58] H. Gülhan, H. Özgün, M. E. Erşahin, R. K. Dereli and İ. Öztürk, “İstanbul’daki biyolojik atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonunun modelleme metodu ile tahmini,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 30, no. 1, pp. 59–67, 2018.
- [59] P. Yapıcıoğlu and Ö. Demir, “Environmental performances of the wastewater treatment plants: Green Index,” *International Journal of Global Warming*, vol. 21, no. 1, pp. 1–19, 2020.

Crayfish Optimization Algorithm

Osman Karataş^a, Celal Yaşar^{b,1}, Hasan Temurtaş^c, Serdar Özyön^d

^a Kütahya Dumlupınar University, Institute of Graduate Education, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0009-0006-3067-1157

^b Kütahya Health Science University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-5069-8545

^c Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0000-0001-6738-3024

^d Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Kütahya, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-4469-3908

Abstract

This study aims to improve the performance of the Crayfish Optimization Algorithm (COA), a swarm intelligence algorithm recently introduced in the literature, on various test functions with fixed and variable dimensions. Optimization can be defined as making a system as efficient as possible at the least cost, within certain constraints. Numerous optimization algorithms have been designed in the literature to obtain the best solutions for specific problems. The most critical aspects in solving these problems are modeling the problem correctly, determining the parameters and constraints, and selecting an appropriate meta-heuristic algorithm for solving the objective function. Not every algorithm is suitable for every problem structure. While some algorithms solve fixed-dimension test functions better, others may perform better on variable-dimension test functions. In this study, the COA algorithm's performance was evaluated on 10 test functions previously used in the literature, consisting of three fixed-dimension functions (Schaffer Function, Himmelblau Function, Kowalik Function) and seven variable-dimension functions, including one unimodal (Elliptic Function) and six multimodal functions (Non-Continuous Rastrigin Function, Alpine Function, Levy Function, Weierstrass Function, Michalewicz Function, Dixon & Price Function). The solution values obtained for each of the selected functions were compared with the solutions obtained using the Harris Hawks Optimizer (HHO), the Charged System Search Algorithm (CSS), and the Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA).

Keywords: “Crayfish optimization algorithm (COA), Harris hawks optimizer (HHO), charged system search algorithm (CSS), backtracking search optimization (BSA), fixed and variable size unimodal and multimodal test functions.”

1. Giriş

Son yıllarda, sorunları çözmenin giderek artan karmaşıklığı ve nihai sonuçların belirsizliği ile daha iyi optimizasyon algoritmalarına olan talep artmaktadır. Optimizasyon problemleri mühendislikte ve karar verme süreçlerinde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bir problemin optimizasyonu, verilen kısıtlar altında o problem için mevcut olan çözümler arasında en iyi olana ulaşmak demektir, kısaca en iyi çözümü bulmaktır. Bu tür problemlerin çözümü için önceleri deterministik (belirli) yöntemleri kullanan geleneksel teknikler kullanılırken, son yıllarda sıklıkla deterministik olmayan yöntemleri kullanan meta-sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir [1-5].

Meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları optimal çözümü elde etmek için genellikle iteratif çözüm sürecinde çözüm aralığında birden fazla çözümle başlarlar. Bu tür algoritmalarda her iterasyonda çözümler, yalnızca amaç fonksiyonuna bağlı olarak sezgisel tabanlı karar alma ile güncellenirler. Elde edilen tüm çözümler belirli bir bölgeye çok yakınsa, algoritmanın yerel optimizasyona takılması ve daha iyi bir çözüm elde edememesi durumu ortaya çıkar. Güncelleme formülü değeri çok büyük veya çok küçük olduğunda çözümün arama kapsamından çıkması söz konusu olabilir. Bu durumda algoritmanın optimizasyon performansı düşecektir. Yerel optimizasyon, belirli bir aralıktaki çözümün minimumunu veya maksimumunu ifade eder. Bu ifade tüm bölgenin minimumu veya maksimumu anlamına gelmez. Küresel optimum ise tüm bölgede çözümün minimumunu veya maksimumunu ifade eder [6].

Geleneksel ile meta-sezgisel algoritmalar karşılaştırıldığında, meta-sezgisel algoritmaların anlaşılması ve uygulanması daha kolay olduğu görülür. Geleneksel optimizasyon algoritmaları, hesaplama karmaşıklığı ve yakınsama açısından teorik olarak

¹ Corresponding Author
E-mail Address: celal_yasar@ksbu.edu.tr

analiz edilebilir. Meta-sezgisel algoritma, yerel optimumdan atlama ve etkili tasarım yoluyla bir noktaya yakınsama arasında iyi bir dengeye sahip olabilir, bu da belirli bir optimizasyon problemi için küresel optimumu bulma olasılığını artırır. Meta-sezgisel algoritmalar çözüm alanından ve başlangıç koşullarından bağımsız olarak ve ilave olarak güçlü sağlamlığa sahip oldukları için optimizasyon probleminin küresel en iyi çözümünü bulabildiklerinden pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle günümüzde literatürde doğanın özelliklerinden esinlenerek geliştirilmiş birçok türde algoritmaya rastlanmaktadır. Bu algoritmalar sürü zekâsı, fizik tabanlı, evrimsel ve insandan ilham alan algoritmalar olarak dört kategoriye ayrılabilir [7].

Doğada bulunan hayvanların davranışlarından esinlenen algoritmalar sürü zekâsı algoritmaları denir. Bu grupta literatürde bulunan algoritmalar bazılarını, parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization, PSO) [8] ve yapay arı kolonisi algoritması (artificial bee colony algorithm, ABC) [9] örnek olarak verilebilir.

Fiziksel olaylardan esinlenen algoritmalar fizik tabanlı algoritmalar denir. Fizik tabanlı algoritmalar alanında birçok temsili çalışma bulunmaktadır. Bu gruba ait literatürde bulunan algoritmalar bazılarını ise, yerçekimi arama algoritması (gravitational search algorithm, GSA) [10] ve termal değişim optimizasyonu (thermal exchange optimization, TEO) [11] örnek olarak sayılabilir.

Evrimsel algoritmalar, doğanın evrim mekanizmasını taklit eden bir tür meta-sezgisel algoritmadır. Bu gruba ait literatürde bulunan algoritmalar bazılarını, genetik algoritmalar (genetic algorithm, GA) [12], geri izleme arama optimizasyonu (backtracking search optimization algorithm BSA) [13] ve farksal gelişim (differential evolution, DE) [14] algoritması örnek olarak verilebilir.

İnsandan esinlenen algoritmalar ise, insan davranış alışkanlıklarından esinlenen meta-sezgisel algoritmalarlardır. Bu gruba ait literatürde bulunan algoritmalar bazılarını ise, harmoni arama (harmony search, HS) [15] ve öğretim öğrenme tabanlı optimizasyon (teaching learning based optimization, TLBO) [16] örnek olarak sayılabilir.

Son yıllarda literatüre birçok meta-sezgisel algoritma kazandırılmış olsa da bütün algoritmalar tüm problemleri çözer denilemez. Bir algoritma bir problemde çok iyi bir etkiye sahip olduğunda, diğer problemlerde iyi bir etkiye sahip olmayabilir. Bu nedenle her geçen gün yeni meta sezgisel algoritmalar üretilerek literatüre kazandırılmaya devam edilmektedir. Bu çalışmada son dönemde Jia ve arkadaşları tarafından geliştirilen kerevitin beslenme davranışı ve yazlık davranışına dayalı yeni bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması olan kerevit optimizasyon algoritmasının (crayfish optimization algorithm - COA) [7] çeşitli test fonksiyonları üzerlerindeki çözüm bulma yeteneği ve performansı araştırılmıştır.

Bu çalışmada COA algoritması toplamda on adet sabit ve değişken boyutlara sahip unimodal ve multimodal test fonksiyonuna uygulanmıştır. COA'nın uygulanmasıyla elde edilen sonuçları karşılaştırmak için literatürden üç farklı algoritma seçilerek aynı fonksiyonlara aynı şartlarda uygulanmıştır. Çalışmada sürü tabanlı olan haris şahini optimize edici (harris hawks optimizer-HHO) [17, 18], fizik tabanlı olan yüklü sistem arama algoritması (charged system search algorithm-CSS) [19, 20] ve evrim tabanlı olan geri izleme arama optimizasyonu (backtracking search optimization algorithm-BSA) [13] algoritması seçilmiştir. Sonuçları karşılaştırma için ele alınan bu algoritmalar, HHO algoritması, küresel optimum arayışında etkili keşif ve sömürü aşamaları sunması nedeniyle literatürde birçok zorlu optimizasyon probleminde başarılı bulunmuştur. Özellikle hızlı yakınsama ve yüksek çözüm hassasiyeti sağlaması güçlü yönlerindendir. Ancak, HHO bazı durumlarda erken yakınsama (premature convergence) problemine yatkın olabilir ve çok karmaşık arama alanlarında çeşitliliği korumakta zorlanabilir. CSS algoritması ise, güçlü fiziksel temelli modellemesi sayesinde yüksek keşif kapasitesi ve iyi küresel arama yeteneği sunar. Özellikle başlangıç aşamalarında çözüm alanında geniş kapsamlı araştırma yapabilmesi kuvvetli bir yönüdür. Ancak, literatürde CSS'in işlem süresi açısından diğer meta-sezgisel algoritmalarla göre daha maliyetli olabileceği ve parametre ayarlarının sonuçlar üzerinde önemli etkiler yaratabileceği belirtilmiştir. BSA'nın ise güçlü ve zayıf yönleri incelenirse, hafif yapısı ve düşük parametre bağımlılığı nedeniyle hızlı uygulama ve düşük hesaplama maliyeti avantajlarına sahiptir. Ayrıca, yerel optimumlardan kaçınma kabiliyeti yüksektir. Bununla birlikte, özellikle çok karmaşık, yüksek boyutlu problemlerde, keşif ve sömürü dengesi açısından diğer gelişmiş algoritmalarla kıyasla daha düşük performans sergileyebileceği değerlendirilmektedir.

2. Kerevit Optimizasyon Algoritması (Crayfish Optimization Algorithm - COA)

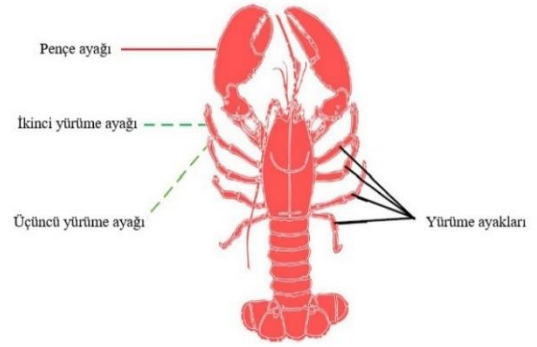
2.1. Doğadaki Kerevit ve ilham Kaynağı

Kerevit karidese benzer ve kabuğu çok serttir. Hayvan taksonomisinde Arthropoda, Crustacea ve Decapoda sınıflarına ait olup genellikle tatlı su habitatının önemli bir türü olarak kabul edilir. Kerevitler göller, nehirler, akarsular, geçici göletler ve sadece mevsimsel olarak ıslak kalan alanlara kadar çok çeşitli tatlı su habitatlarında yaşarlar. Kerevitlerin çukur kazma ve geceleri ortaya çıkma alışkanlığı vardır. Dünyada kaydedilen 600'den fazla tatlı su kereviti türü olup bunlar coğrafi konum veya habitatından bağımsız olarak çukur kazma yeteneğine sahiptir. Bütün kerevitlerin mağaraları vardır ve bu mağaraların şekli ve işlevi türlere göre değişir. Bu değişiklik, kerevitlerin mağara ekolojisine dayalı olarak sınıflandırılmasından elde edilmiştir. Kerevit, doğal düşmanlardan ve yaz sıcağından kaçınmak için çukur kazar. Ayrıca, yırtıcılardan kaçınmak, vücudunun kurumasını önlemek, yiyecek aramak ve kuluçka bakımını sağlamak için de mağaralar kullanılabilir. Kerevit, belirli bir sıcaklık

aralığında yaşayan su hayvanıdır. Çeşitli hava koşullarına uyum sağlayabilir, ticari olarak pelet yemi sağlayabilir ve ayrıca ucuza yetiştirilebilir. Altı aylık beslenmeden sonra kerevit 40-60 gr'a kadar büyüyebilir. Kerevit, tüm yaprak döken canlılar gibi, yaşam ortamındaki sıcaklık değişiklikleri kerevitlerin büyüme oranlarını uzatır veya kısaltır. Bu nedenle, sıcaklığın kerevitlerin hayatta kalması üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Kerevitler 11 °C ile 44 °C arasında bu canlı hayatta kalabilir, ancak bu durum kerevitlerin büyümesi için uygun olduğu anlamına gelmez. Kerevitlerin büyümesi için uygun sıcaklık 15 °C ila 30 °C'dir. Kerevitlerin hayatta kalması için en uygun sıcaklık 25 °C'dir. Su sıcaklığı çok düşükse, bu durum kerevitlerin daha az besin yemelerine veya hiç besin yememelerine neden olur. Böylece bu durum kerevitlerin büyümelerini etkiler ve hatta ölümlerine neden olabilir. Su sıcaklığının çok yüksek olması da, kerevitlerin oksijensiz olarak karaya çıkmalarına ve hatta ölümlerine neden olur. Kerevitin şematik diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. Kerevit, her türlü tahıl, sebze, karasal otlar, su kütlelerindeki su bitkileri, epifitik algler, zooplanktonlar, suda yaşayan böcekler, küçük benthos ve hayvan leşleri ile beslenebilen omnivor bir hayvandır. Kerevitler avlanırken genellikle pençeleriyle büyük yiyecekleri yakalarlar, tutmak ve kemirmek için 2. ve 3. yürüme ayaklarını göndermeden önce parçalarlar. Küçük yiyecekler için ise doğrudan tutmak ve ısırmak için ikinci ve üçüncü yürüme ayaklarını Şekil 2'de gösterildiği gibi kullanırlar. Avlandıktan sonra, genellikle hızlı bir şekilde saklanırlar veya diğer kerevitler tarafından soyulmaktan korunmak için kışkaçlarını kullanırlar [7].



Şekil 1. Kerevitin şematik diyagramı [7].



Şekil 2. Kerevitin yapısal diyagramı [7].

Kerevitlerin belirtilen bu özellikleri temel alınarak, yeni bir sürü zekâsı tabanlı optimizasyon algoritması olan COA oluşturulmuştur. Bu algoritma kerevitlerin yazlık tatil yeri arama, birbirleriyle rekabet etme ve besin arama gibi davranışlarına dayalı matematiksel bir model kurar. Diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırıldığında, COA, kerevitlerin yazlık tatil köyü mekanizmasını, rekabet mekanizmasını ve besin arama mekanizmasını simüle etmesi bakımından özeldir. COA ayrıca kerevitlerin büyük yiyecekleri parçalama sürecini de simüle etmiştir [7]. Aşağıdaki bölümlerde verilmiş olan 10 adet farklı matematiksel test fonksiyonlarının çözümüne ilişkin sonuçlardan, COA'nın mevcut meta-sezgisel algoritmalara kıyasla büyük avantajlara sahip olduğu görülmüştür.

2.2. İlham Kaynağı

COA, kerevitlerin yiyecek arama, yaz tatili için yer arama ve rekabetçi davranışlarından ilham alarak oluşturulmuştur. Yiyecek arama aşaması ve rekabet aşaması COA'nın kullanım (explotation) aşamasıdır ve yaz tatili aşaması ise COA'nın keşif aşamasıdır. Sürü zekâsı optimizasyonunun özelliklerini yansıtmak için, kerevit kolonisi (X), algoritmanın ilk aşamasında tanımlanır. X_i , bir adet çözümü gösteren i . kerevitin konumudur. X_i , uygunluk değeri olarak da bilinen bir çözüm elde etmek için $f(x)$ fonksiyonunu oluşturur. COA'nın keşfi ve kullanılması, bireyin bulunduğu ortamın sıcaklığını temsil eden rastgele bir sabit olan sıcaklık tarafından düzenlenir. Sıcaklık çok yüksek olduğunda, COA yaz tatili aşamasına veya rekabet aşamasına girecektir. Yaz tatili aşamasında, yeni çözüm bireysel konum olan X_i ve mağara konumu olan X_{shade} 'e göre güncellenir. Sıcaklık uygun olduğunda, COA yiyecek arama aşamasına girecektir. Yiyecek arama aşamasında, yiyeceğin yeri en iyi yer ve aynı zamanda en uygun çözüm olarak da bilinir. Yiyeceğin boyutu, mevcut çözüm uygunluğu ve optimal çözüm $fitness_{food}$ ile elde edilir. Besin uygun olduğunda, konumları X_i , yiyecek alım sabiti p ve yiyecek pozisyonu X_{food} güncellemelerine göre kerevitler yeni çözümler üretirler. Besin çok büyük olduğunda, kerevit yiyeceğini parçalamak için pençe ayağını kullanacak ve ardından dönüşümlü olarak yemek için ikinci ve üçüncü yürüme ayaklarını kullanacaktır. Kerevitlerde besin alımı kontrol edilir. Yiyecek alımı sıcaklık ile belirlenir ve pozitif bir dağılım gösterir [7].

2.3. Popülasyonu Başlatma

Çok boyutlu optimizasyon probleminde, her kerevit ($1 \times dim$ 'lik) bir matristir. Her sütun matrisi bir problemin çözümünü temsil eder. Bir dizi değışkeninde ($X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,dim}$), her X_i değışkeni üst ve alt sınırlar arasında yer almalıdır. COA'nın başlatılması, uzayda rastgele bir grup aday çözüm için X oluşturmaktır. Aday çözüm X , popülasyon büyüklüğü N ve boyut sayısı olan dim 'e dayanmaktadır. COA algoritmasının başlatılması Denklem (1)'de gösterilmiştir [7].

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_N] = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \dots & X_{1,j} & \dots & X_{1,dim} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{i,1} & \dots & X_{i,j} & \dots & X_{i,dim} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{N,1} & \dots & X_{N,j} & \dots & X_{N,dim} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada X başlangıç popülasyon konumunu, N popülasyon sayısını ve dim ise popülasyon boyutunu göstermektedir. Denklemde $X_{i,j}$ ise i . Bireyin j . boyutundaki konumunu göstermekte olup değeri Denklem (2) kullanılarak bulunur.

$$X_{i,j} = lb_j + (ub_j - lb_j) \times rand \quad (2)$$

Denklemde lb_j ifadesi j . boyutun alt sınırını temsil ederken, ub_j ise j . boyutun üst sınırını temsil eder ve $rand$ ise rastgele bir sayıdır.

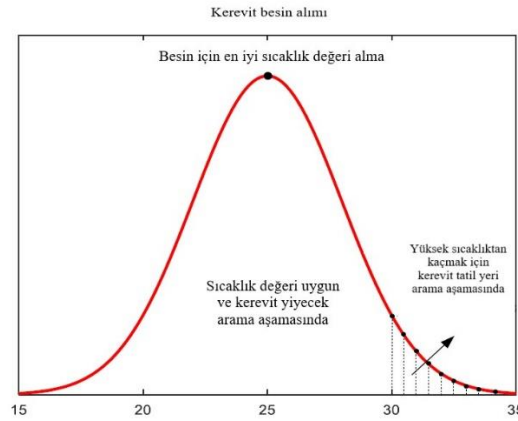
2.4. Kerevitlerin Sıcaklığını ve Besin Alımını Tanımlama

Sıcaklığın değişmesi kerevitin davranışını etkileyecek ve onun farklı aşamalara girmesini sağlayacaktır. Sıcaklık, Denklem (3)'te tanımlanmıştır. Sıcaklık 30 °C'den yüksek olduğunda, kerevit yaz tatili için serin bir yer seçecektir. Kerevit sıcaklık değerleri uygun olduğunda yiyecek arama davranışı gerçekleştirecektir. Kerevitin beslenme miktarı sıcaklıktan etkilenir. Kerevitin sıcaklık açısından beslenme aralık değerleri 15 °C ile 30 °C olup en iyi değer 25 °C'dir. Bu nedenle, kerevitin beslenme miktarı normal dağılıma yaklaştırılabilir, böylece beslenme miktarı sıcaklıktan etkilenir. Kerevitlerin 20 °C ila 30 °C arasında güçlü yiyecek arama davranışı olduğundan, COA 20 °C ila 35 °C arasında bir sıcaklık aralığı tanımlar. Kerevitlerin besin alımının matematiksel modeli Denklem (4)'te ve besin alımının şematik diyagramı ise Şekil 3'te gösterilmiştir [7].

$$temp = rand \times 15 + 20 \quad (3)$$

$$p = C_1 \times \left(\frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma}} \times \exp \left(-\frac{(temp - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right) \quad (4)$$

Denklemelerde, $temp$ kerevitin bulunduğu ortamın sıcaklığını, μ kerevit için en uygun sıcaklık değerini temsil etmektedir. Denklemelerde, σ ve C_1 ise kerevitlerin farklı sıcaklıklarda besin alımını kontrol etmek için kullanılır.



Şekil 3. Kerevitin besin alımı üzerinde ortam sıcaklığının etkisi [7].

2.5. Yaz Tatili Beldesi Aşaması (Keşif)

Keşif aşamasında $temp > 30$ olduğunda, sıcaklık çok yüksek olup kerevit yaz tatili için mağaraya girmeyi seçecektir. Mağara X_{shade} Denklem (5)'te tanımlanmıştır. Denklemde, X_G iterasyon sayısı kadar elde edilen en uygun konumu temsil eder ve X_L mevcut popülasyonun en uygun konumunu temsil eder [7].

$$X_{shade} = (X_G + X_L) / 2 \quad (5)$$

Kerevitlerin mağaralar için mücadele etmesi rastgele bir olaydır. Şekil 4.A'da gösterildiği gibi $rand < 0,5$ olursa, bu mağaralar için yarışan başka bir kerevit olmadığı ve kerevitlerin yaz tatili için doğrudan mağaraya gireceği anlamına gelir. Bu anda, kerevit Denklem (6) kullanılarak yazlık tatil beldesi için mağaraya girecektir [7].

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + C_2 \times rand \times (X_{shade} - X_{i,j}^t) \quad (6)$$

Burada, t geçerli iterasyon sayısını ve $t+1$ ise yeni nesil iterasyon sayısını temsil eder, C_2 ise Denklem (7)'de gösterildiği gibi azalan bir eğridir. Burada T , maksimum iterasyon sayısını göstermektedir.

$$C_2 = 2 - (t / T) \quad (7)$$

Yazlık tatil beldesi aşamasında (keşif) kerevitin amacı, en uygun çözümü temsil eden mağaraya yaklaşımdır. Bu noktada kerevit mağaraya yaklaşacaktır. Bu, bireyleri en uygun çözüme yaklaştırır ve COA'dan yararlanma yeteneğini artırır ve böylece algoritmanın daha hızlı bir şekilde yakınsamasını sağlar [7].

2.6. Yarışma Aşaması (Kullanım)

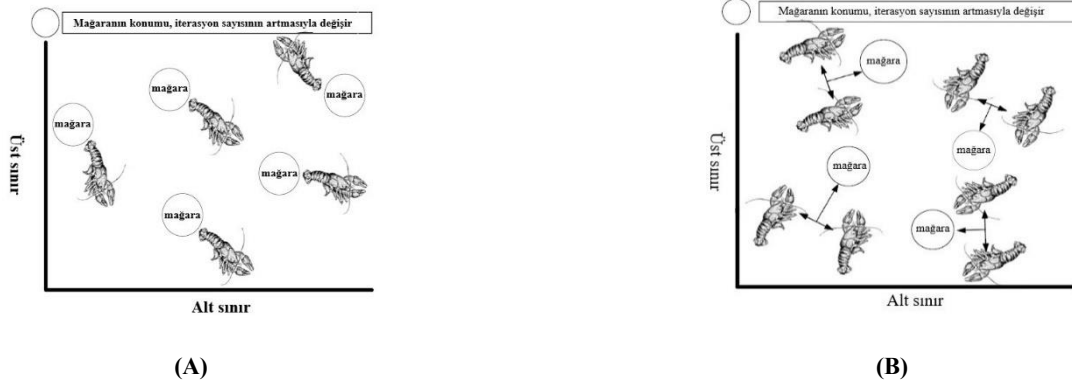
Şekil 4.B'de gösterildiği gibi bu aşamada $temp > 30$ ve $rand \geq 0,5$ olduğunda diğer kerevitlerin de mağaraya ilgi duyduğu ve mağarayı ele geçirmek için birbirleriyle mücadele edecekleri anlamına gelir. Kerevitin mağara için rekabeti Denklem (8)'le ifade edilmiştir [7].

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t - X_{z,j}^t + X_{shade} \quad (8)$$

Burada z Denklem (9)'da gösterildiği gibi kerevitin rastgele bir bireyini temsil eder.

$$z = round(rand \times (N - 1)) + 1 \quad (9)$$

Yarışma aşamasında, kerevitler birbirleriyle yarışır. Kerevit kendi X_i konumunu, diğer bir kerevitin X_s konumuna göre ayarlar. Bu şekilde konumlar ayarlanarak, COA'nın arama aralığı genişletilir ve böylelikle algoritmanın keşif yeteneği geliştirilmiş olur.



Şekil 4. A) Kerevitler doğrudan mağaraya girer. B) Kerevitler mağaraya sahip olmak için birbirleriyle yarışır [7].

2.7. Besin Arama Aşaması (Sömürü)

Bu aşamada $temp \leq 30$ olduğunda, sıcaklık kerevitlerin beslenmesi için uygundur ve bu aşamada kerevit yiyeceğe doğru hareket edecektir. Yiyeceği bulduktan sonra, kerevit yiyeceğin büyüklüğünü değerlendirecektir. Eğer yiyecek çok büyükse, kerevit yiyeceği pençeleriyle yırtacak ve dönüşümlü olarak ikinci ve üçüncü yürüme ayaklarıyla yiyecektir. Yiyecek konumu X_{food} olarak Denklem (10)'a göre tanımlanır [7].

$$X_{food} = X_G \quad (10)$$

Gıda boyutu ise Q olarak Denklem (11)'e göre tanımlanmaktadır.

$$Q = C_3 \times rand \times (fitness_i / fitness_{food}) \quad (11)$$

Denklemden C_3 besin faktörüdür ve en büyük besini temsil eder ve değeri sabit olarak 3'tür, $fitness_b$, birinci kerevitin uygunluk değerini ve $fitness_{food}$ ise besin konumunun uygunluk değerini temsil eder.

Kerevitin yiyecek boyutuna ilişkin durumu en büyük yiyeceğin boyutundan gelir. $Q > (C_3 + 1)/2$ olduğunda, bu yiyeceğin çok büyük olduğu anlamına gelir. Bu durumda Şekil 5.A'da gösterildiği gibi kerevit ilk pençe ayağıyla yiyeceği yırtacaktır. Bu yiyeceğe ait matematiksel ifade Denklem (12)'de tanımlanmıştır [7].

$$X_{food} = \exp\left(-\frac{1}{Q}\right) \times X_{food} \quad (12)$$



Şekil 5. A) Kerevit yemekten önce yiyecekleri parçalar. B) Kerevit doğrudan yemeğini yer [7].

Yiyecek parçalandığında ve küçüldüğünde, ikinci ve üçüncü pençeler dönüşümlü olarak yiyeceği alır ve ağza koyar. Alternatif işlemi simüle etmek için ise sinüs fonksiyonu ve kosinüs fonksiyonunun kombinasyonu kullanılır. Ayrıca Şekil 5.B'de gösterildiği kerevit tarafından elde edilen yiyecek aynı zamanda gıda alımı ile de ilgilidir, bu nedenle yiyecek arama eşitliği Denklem (13)'te verilmiştir [7].

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + X_{food} \times p \times (\cos(2 \times \pi \times rand) - \sin(2 \times \pi \times rand)) \quad (13)$$

$Q \leq (C_3 + 1)/2$ olduğunda, kerevitin sadece yiyeceğe doğru hareket etmesi ve doğrudan yemesi gerekir, bu durum ise Denklem (14)'te gösterilmiştir.

$$X_{i,j}^{t+1} = (X_{i,j}^t - X_{food}) \times p + p \times rand \times X_{i,j}^t \quad (14)$$

Besin arama aşamasında, kerevitler yiyeceklerinin Q boyutuna bağlı olarak farklı besleme yöntemleri kullanırlar ve yiyecek X_{food} en uygun çözümü temsil eder. Besinin Q boyutu kerevitin gıda yemesi için uygun olduğunda, kerevit yiyeceğe yaklaşacaktır. Q değerinin çok büyük olması, kerevit ile optimal çözüm arasında önemli bir fark olduğunu gösterir. Bu nedenle X_{food} azaltılmalı ve besine yaklaştırılmalıdır. Ayrıca kerevit için besin alımı geliştirme algoritmasının rastgeleliği kontrol edilmelidir. Besin arama aşaması boyunca, COA en uygun çözüme yaklaşacak, algoritmanın yararlanma yeteneğini geliştirecek ve iyi bir yakınsama yeteneğine sahip olmasını sağlayacaktır [7].

2.8. Algoritma Uygulaması

Adım 1: Parametre tanıtımı ve popülasyonun başlatılması

İterasyon sayısı T , popülasyon sayısı N , boyut dim , üst sınır ub ve alt sınır lb 'yi tanımlayarak üst ve alt sınırlara dayalı olarak popülasyon X 'i başlatın. Popülasyon başlatma adımı Denklem (2)'den elde edilir [7].

Adım 2: Sıcaklık tanımı

Kerevitin bulunduğu ortam sıcaklığı, COA'nın farklı aşamalara girmesini sağlamak için Denklem (3)'e göre tanımlanır.

Adım 3: Yaz tatili aşaması ve yarışma aşaması

3.1. $temp > 30$ ve $rand < 0,5$ olduğunda, COA yaz tatili aşamasına girer. Bu sırada COA, mağara konumuna (X_{shade}) ve kerevit konumuna ($X_{i,j}^t$) göre yeni bir ($X_{i,j}^{t+1}$) konumu elde eder. Güncellenmiş formül Denklem (6)'daki gibi olur ve sonra 5. adıma geçilir.

3.2. $temp > 30$ ve $rand \geq 0,5$ olduğunda, COA rekabet aşamasına girer. Bu aşamada, iki kerevit Denklem (8)'e göre mağara için rekabet edecek ve mağara pozisyonuna (X_{shade}) ve iki kerevitin pozisyonuna (X_{ij}^t , X_{zj}^t) göre yeni bir (X_{ij}^{t+1}) pozisyonu elde edecektir ve sonrasında 5. adıma geçilir.

Adım 4: Yiyecek arama aşaması

4.1. $temp \leq 30$ olduğunda, COA yiyecek arama aşamasına girer, yiyecek alımı p ve yiyecek boyutu Q olmak üzere Denklem (4) ve (11)'e göre tanımlanır.

4.2. $Q > (C_3 + I)/2$ olur ise, besin Denklem (12)'ye göre parçalanır. Bundan sonra ise Denklem (13) aracılığıyla yeni konum elde edilir ve adım 5'e geçilir.

4.3. $Q \leq (C_3 + I)/2$ olur ise, Denklem (14) aracılığıyla yeni bir konum elde edilir ve 5. adıma geçilir.

Adım 5: Değerlendirme aşaması

Bu aşamada popülasyon değerlendirilir ve döngüden çıkıp çıkılmayacağına karar verilir. Değilse, 2. adıma geri dönlür.

Adım 6: En iyi $fitness_{best}$ değerini çıkarma

2.9. COA'nın Sözde Kodu ve Akış Şeması

COA'nın sözde kodu aşağıdaki gibidir [7]:

Algoritma 1. COA Algoritmasının sözde kodu [7]

Başlatma için iterasyon sayısı T , popülasyon sayısı N ve boyut sayısı dim belirleme.

Rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturma.

X_G ve X_L değerleri elde etmek için popülasyonun uygunluk değerini hesaplama.

While $t < T$

Sıcaklığın Denklem (3) ile tanımlanması.

If $temp > 30$

Mağara yeri için X_{shade} 'i Denklem (5)'e göre tanımlama.

If $rand < 0,5$

Kerevit, yazlık tatil yeri arama aşamasını Denklem (6)'ya göre yürütür.

Else

Kerevitler, Denklem (8) aracılığıyla mağaralar için rekabet eder.

End

Else

Besin alımı p ve besin büyüklüğü Q , Denklem (4) ve Denklem (11) ile elde edilir.

If $Q > 2$

Kerevit yiyecekleri Denklem (12) ile parçalar.

Kerevit, Denklem (13)'e göre yiyecek arar.

Else

Kerevit, Denklem (14)'e göre yiyecek arar.

End

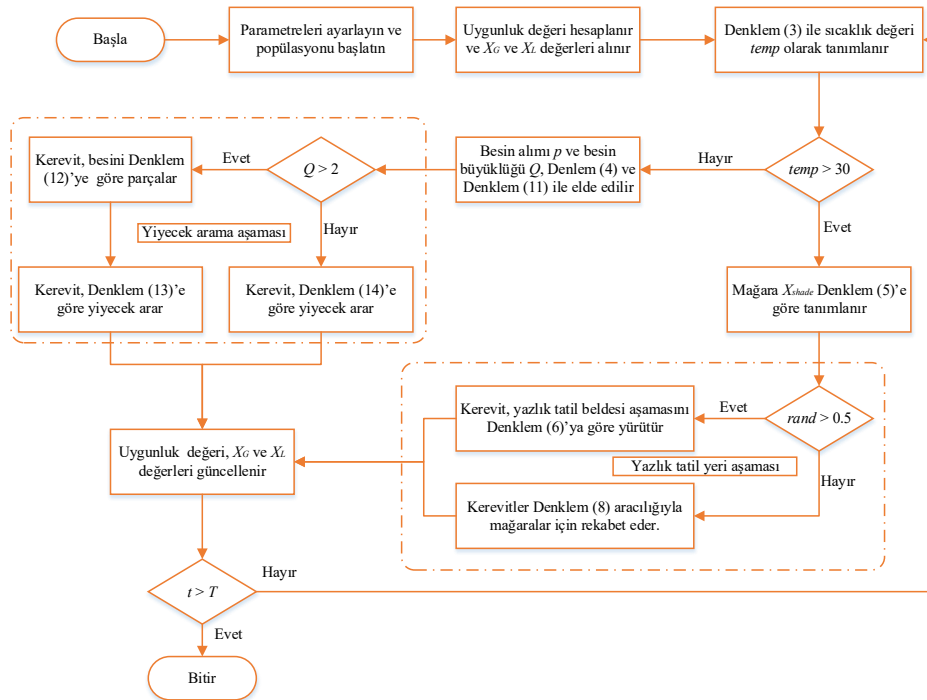
End

X_G ve X_L değerleri ile uygunluk değerlerini güncelleme.

$t = t + 1$

End

COA'nın akış şeması Şekil 6'da gösterilmiştir [7].



Şekil 6. COA'nın akış şeması [7].

3. Sonuçları Karşılaştırmak için Seçilen Diğer Algoritmalar

Bu bölümde COA algoritması uygulanarak elde edilen sonuçları karşılaştırmak için kullanılan HHO, CSS ve BSA algoritmalarının yapıları orijinal kaynaklarından alıntılanarak kısaca özetlenmiştir.

3.1. Harris Şahin Optimizasyonu (HHO) Algoritması

Bu algoritma, doğada iyi bilinen bir yırtıcı kuş olan Harris şahinlerinin avlanma stratejisi benzetimi yapılarak oluşturulmuştur [17, 18]. Harris şahinleri, diğer yırtıcı kuşlardan farklı olarak genellikle aile üyeleriyle birlikte bir avı keşfetmek ve yakalamak için saldırırlar. Bu kuş, potansiyel avı izleme, çevreleme, temizleme ve sonunda saldırma konusunda evrimleşmiş yenilikçi takım kovalama yetenekleri gösterir. Bu akıllı kuşlar, üreme dışı mevsimde birkaç bireyden oluşan akşam yemeği partileri düzenleyebilirler. Yırtıcı kuşlar aleminde gerçek anlamda işbirlikçi avcılar olarak bilinirler. Harris şahinleri avlanma süreçlerinde özellikle tavşan avlama sürecinde sürü olarak hareket ederler. Sürünün bir lideri (en iyi şahin) bulunur, lider ve sürünün diğer üyeleri öncelikle keşif uçuşları yaparlar. Harris şahinleri, koşulların dinamik doğasına ve bir avın kaçış modellerine bağlı olarak çeşitli kovalama stratejileri gösterebilirler. Bir değiştirme taktiği, lider şahin avın üzerine eğilip kaybolduğunda ve kovalamaca parti üyelerinden biri tarafından sürdürüldüğünde gerçekleşir. Bu durum kaçan tavşanı şaşırtır, tavşanı yorar ve onun savunmasızlığını artırır. Son olarak, genellikle en güçlü ve deneyimli olan şahinlerden biri yorgun tavşanı zahmetsizce yakalayıp diğer parti üyeleriyle paylaşır. Harris şahinlerinin bu özellikleri Heidari ve arkadaşları tarafından 2019 yılında harris şahinleri optimizasyonu (harris hawks optimization, HHO) algoritması olarak modellenmiştir [17]. HHO popülasyon temelli bir optimizasyon tekniği olup keşif, keşiften saldırıya geçiş ve saldırı aşamalarından oluşur. HHO’da keşif aşamasında iki farklı strateji olarak uygulanır. Keşiften saldırıya geçiş aşamasında, avın kaçma sırasında enerjisinin azalması durumuna karşılık Harris şahinleri farklı saldırı davranışları arasında geçişler yapabilirler. Bu nedenle saldırı aşaması algoritmada yumuşak, sert, kademeli hızlı dalışlarla yumuşak ve kademeli hızlı dalışlarla sert kuşatma olmak üzere dört farklı strateji olarak modellenmiştir. HHO algoritmasının sözde kodu Algoritma 2’de verilmiştir [18].

Algoritma 2. HHO Algoritmasının sözde kodu [17, 18]**Inputs:** N popülasyon büyüklüğü ve maksimum iterasyon sayısı T .**Outputs:** Tavşanın konumu ve tavşanın *fitness* değeri.Rastgele bir popülasyonu başlat. $X_i(i=1,2,...,N)$.**while** (durdurma kriteri sağlanmadıysa) **do** Şahinlerin *fitness* değerlerini hesapla. X_{rabbit} tavşanın konumunu ayarla (en iyi konum olarak). **for** (her şahin (X_i)) **do** Başlangıç enerjisi E_0 , sıçrama gücü J ve E değerini güncelle. **if** ($|E| \geq 1$) **then** Keşif Aşamasındaki Konum vektörünü güncelle. **if** ($|E| < 1$) **then** (Sömürü Aşaması) **if** ($r \geq 0,5$ ve $|E| \geq 0,5$) **then** Yumuşak Kuşatma Konum vektörünü güncelle. **else if** ($r \geq 0,5$ ve $|E| < 0,5$) **then** Sıkı Kuşatma Konum vektörünü güncelle. **else if** ($r < 0,5$ ve $|E| \geq 0,5$) **then** İlerleyici Hızlı Dalmalarla Yumuşak Kuşatma Konum vektörünü güncelle. **else if** ($r < 0,5$ ve $|E| < 0,5$) **then** İlerleyici Hızlı Dalmalarla Sıkı Kuşatma Konum vektörünü güncelle. **Return** X_{rabbit} **3.2. CSS Algoritması**

Yüklü Sistem Arama (CSS) algoritması, Kaveh ve Talatahari tarafından geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. Algoritmanın temeli, Newton'un hareket yasaları ile elektrik fiziğindeki Coulomb ve Gauss yasalarına dayanır. Bu algortmada, her bir ajan (çözüm adayı), elektrik yüklü bir parçacık (charged particle-CP) olarak ele alınır. Her bir CP, Coulomb ve Gauss yasalarına uygun şekilde diğer yüklü parçacıklar üzerine elektriksel kuvvet uygular ve bu yüklü bir küre şeklinde modellenir. Bu kuvvetin büyüklüğü, küre içindeki CP için CP'ler arasındaki mesafeyle orantılıyken, kürenin dışında bulunan bir CP için parçacıklar arasındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır ve bu kuvvetler çekici veya itici olarak ortaya çıkabilir. Arama alanındaki CP'lerin başlangıç konumları rastgele belirlenir. Genellikle çekici olarak çıkan kuvvet, CP'leri arama alanı içinde belirli bir alanda toplarken, itici kuvvet CP'leri dağıtmaya çalışır. Sonuç kuvvetleri ve hareket yasaları, CP'lerin yeni konumlarını belirler. Bu kurala göre, her CP, sonuç kuvvetleri ve önceki hızıyla yeni konumuna doğru hareket eder. Algoritma bu şekilde optimizasyon sürecinin ilerlemesini sağlar. Her CP, CP arama alanından çıkarsa, konumu, uyum aramasına dayalı yaklaşımla düzeltilir. Ayrıca, en iyi sonuçları kaydetmek için yüklü bellek kullanılır. CSS algoritmasının geliştirilmesi aşağıda kısaca özetlenen sekiz kural üzerinden gerçekleştirilmiştir. CSS algoritmasının bu kurallar çerçevesinde sözde kodu ise Algoritma 3'te verilmiştir [19, 20].

Kural 1: CSS bir dizi yüklü parçacığı (CP) dikkate alır ve her bir CP'nin bir yük büyüklüğü olup uzayı etrafında bir elektrik alanını oluşturur.

Kural 2: CP'lerin başlangıç konumları arama uzayında rastgele belirlenir.

Kural 3: Çekici kuvvetler cinsinden bakıldığında, herhangi bir CP başka bir CP'yi etkileyebilir, yani kötü bir CP iyi bir CP'yi etkileyebilir veya bunun tersi de geçerlidir. İyi bir CP kötü bir CP'yi de çekebilir.

Kural 4: Bir CP üzerinde etkili olan sonuç elektrik kuvvetinin değeri, ajanların birbirinden uzak olduğu ilk iterasyonda, bir CP üzerinde etkili olan sonuç kuvvetinin büyüklüğü, parçacıklar arasındaki ayrımın karesiyle ters orantılıdır. Fakat CP'lerin küçük bir alanda toplandığı ve CP'ler arasındaki ayrımın küçük olduğu durumlarda ise ayrım mesafesinin karesiyle ters orantılı olmak yerine parçacıkların ayrım mesafesiyle orantılı hale gelir.

Kural 5: Her bir CP'nin yeni konumu ve hızı her iterasyonda güncellenir.

Kural 6: Hesaplama maliyetini artırmadan algoritma performansını iyileştirebilmek için en iyi CP vektörlerini ve ilgili amaç fonksiyon değerlerini kayıt altına alabilen bir yüklü bellek (charged memory, CM) kullanılmalıdır.

Kural 7: Birçok meta-sezgisel algortmada olduğu gibi CSS'de de iki büyük sorun vardır. Bu sorunlardan birincisi aramanın başında, sırasında ve sonunda keşif ve kullanım (exploitation) arasındaki denge ve ikincisi ise değişkenlerin sınırlarını ihlal eden bir etkenle nasıl başa çıkılacağı konusudur. İlk sorun, yukarıda belirtilen kuralların uygulanmasıyla doğal olarak çözülür. Ancak ikinci sorunu çözmek için en basit yaklaşımlardan biri, ihlal edilen değişken için en yakın sınır değerlerini kullanmaktır. İhlali gerçekleştiren parçacığı önceki konumuna geri döndürmek bazen zor olabilir. Bu durumda alternatif olarak değişken sınırlarını ihlal eden çözüm vektörünün herhangi bir bileşeni CM'den yeniden üretilebilir.

Kural 8: Algoritmayı sonlandırma kriterleri olarak maksimum yineleme sayısı, iyileştirme olmayan yineleme sayısı, minimum amaç fonksiyonu hatası ve son olarak en iyi ve en kötü CP'ler arasındaki fark işlemlerinden birisi kullanılır.

Algoritma 3. CSS Algoritmasının sözde kodu [19, 20]

Seviye 1: Başlatma• **Adım 1:** *Başlatma.*

CSS algoritma parametrelerini başlatın; Rastgele konumlara ve ilişkili hızlara sahip Yüklü Parçacıklar dizisini başlatın (Kural 1 ve 2).

• **Adım 2:** *CP sıralaması.*

CP'ler için uygunluk fonksiyonunun değerlerini değerlendirin, birbirleriyle karşılaştırın ve artan şekilde sıralayın.

• **Adım 3:** *CM oluşturma.*

CM'deki ilk CP'lerin CMS numarasını ve hedef fonksiyonunun ilişkili değerlerini saklayın.

Seviye 2: Arama• **Adım 1:** *Çekim kuvveti belirleme.*

Her bir CP'yi diğerlerine doğru hareket ettirme olasılığını belirleyin (Kural 3) ve her CP için çekim kuvveti vektörünü hesaplayın (Kural 4).

• **Adım 2:** *Çözüm oluşturma.*

Her bir CP'yi yeni konuma taşıyın ve hızları bulun (Kural 5).

• **Adım 3:** *CP konum düzeltmesi.*

Her CP izin verilen arama alanından çıkarsa, Kural 7'yi kullanarak konumunu düzeltin.

• **Adım 4:** *CP sıralaması.*

Yeni CP'ler için hedef fonksiyonunun değerlerini değerlendirin ve karşılaştırın ve bunları artan şekilde sıralayın.

• **Adım 5:** *CM güncellemesi.*

Bazı yeni CP vektörleri CM'deki en kötü vektörlerden daha iyiye, daha iyi vektörleri CM'ye dahil edin ve en kötü olanları CM'den çıkarın (Kural 6).

Seviye 3: Sonlandırma kriteri kontrolü

• Sonlandırma kriteri karşılanana kadar arama seviyesi adımlarını tekrarlayın (Kural 8).

3.3. BSA Algoritması

BSA algoritması, optimizasyon problemlerinde yerel çözümlerden sıyrılarak küresel çözümler bulmayı hedefler. Algoritmanın işleyişi, başlangıç değerlerinin atanması, ilk seçim aşaması, mutasyon, çaprazlama ve son seçim aşaması gibi beş ana adıma dayanmaktadır. İlk değer verilmesi aşamasında popülasyon büyüklüğü, problemin boyutu, popülasyon içerisindeki bir hedef birey ve son olarak da çözüm uzayındaki en alt ve en üst sınır değerleri belirlenir. Birinci seçim aşamasında arama yönünü hesaplamak için algoritmanın tarihsel popülasyonu belirlenir. Böylece, BSA algoritması geçmişte elde edilen değerleri, bir sonraki karar alma mekanizmasında kullanılmak üzere hafızaya alır. Tarihsel popülasyonunun belirlenmesiyle birlikte popülasyon üyeleri rastgele olarak yeniden sıralanır. Mutasyon aşamasında, mutant popülasyonunun ilk değerleri hesaplanır. Çaprazlama aşamasında, popülasyonun son durumu değerlendirmeye alınır. Bu aşamada, optimizasyon problemine göre yüksek performans gösteren popülasyon üyeleri, hedef popülasyon bireylerini belirlemek amacıyla seçilir. BSA algoritması ayrıca, mutasyon geçiren bireylerin çözüm uzayının dışına çıkmasını önlemek için bir sınırlandırma mekanizması kullanır. İkinci seçim aşamasında, popülasyon güncellenir ve en iyi birey seçilir. Her iterasyon döngüsünde, mevcut küresel en iyi değer tüm popülasyon bireyleriyle karşılaştırılır. Eğer herhangi bir bireyin amaç fonksiyonu değeri, mevcut küresel en iyiden daha üstünse, yeni küresel en iyi değer bu bireyin bulunduğu konum olur. BSA algoritmasının sözde kodu Algoritma 4'de verilmiştir [13].

Algoritma 4. BSA Algoritmasının sözde kodu [13]

Input: *ObjFun, N, D, maxcycle, mixrate, low_{1:D}, up_{1:D}*

Output: *globalminimum, globalminimizer*

// *rnd ~ U(0,1), rndn ~ N(0,1), w=rndint(·), rndint(·) ~ U(1,·) | w ∈ {1, 2, 3,...,N}*

function bsa(ObjFun, N, D, maxcycle, low, up)

// BAŞLANGIÇ

globalminimum=inf

for *i* **from** 1 **to** *N* **do**

for *j* **from** 1 **to** *D* **do**

P_{i,j} = *rnd(up_j - low_j) + low_j* // Popülasyonun başlatılması, P.

oldP_{i,j} = *rnd(up_j - low_j) + low_j* // oldP'nin başlatılması, oldP.

end

fitnessP_i = *ObjFun(P_i)* // P'nin ilk uygunluk değerleri.

end

for *iteration* **from** 1 **to** *maxcycle* **do**

 // SEÇİM-I

if (*a < b* | *a, b ~ U(0,1)*) **then** *oldP* := *P* **end**

oldP := *permuting(oldP)* // 'etkileme'; oldP içindeki iki bireyin pozisyonlarını rasgele değiştirme.

```

Deneme Popülasyonunun Oluşturulması
// MUTASYON
mutant= $P+3 \cdot \text{rndn} \cdot (\text{old}P-P)$ 
// ÇAPRAZLAMA
map $_{1:N, 1:D}=1$  // Başlangıç haritası birlerden oluşan N x D matrisidir.
if ( $c < d \mid c, d \sim U(0,1)$ ) then
  for i from 1 to N do
    map $_{i,u(1:\lfloor \text{mixrate} \cdot \text{rnd} \cdot D \rfloor)} = 0 \mid u = \text{permuting}(1,2,3,\dots,D)$ 
  end
else
  for i from 1 to N do, map $_{i,\text{randi}(D)} = 0$ , end
end
// Deneme Popülasyonu Üretimi, T
T:=mutant
for i from 1 to N do
  for j from 1 to D do
    if map $_{i,j}=1$  then T $_{i,j}=P_{i,j}$ 
  end
end
// Sınır Kontrol Mekanizması
for i from 1 to N do
  for j from 1 to D do
    if (T $_{i,j} < \text{low}_j$ ) or (T $_{i,j} > \text{up}_j$ ) then
      T $_{i,j} = \text{rnd} \cdot (\text{up}_j - \text{low}_j) + \text{low}_j$ 
    end
  end
end
end
// Seçim-II
fitnessT=ObjFun(T)
for i from 1 to N do
  if fitnessT $_i < \text{fitness}P_i$  then
    fitnessP $_i = \text{fitness}T_i$ 
    P $_i = T_i$ 
  end
end
fitnessP $_{\text{best}} = \min(\text{fitness}P) \mid \text{best} \in \{1,2,3,\dots,N\}$ 
if fitnessP $_{\text{best}} < \text{globalminimum}$  then
  globalminimum:=fitnessPbest
  globalminimizer:=P $_{\text{best}}$ 
  // Global minimum ve global minimizer dışarı aktarılır.
end
end

```

4. Test Fonksiyonları

Bu çalışmada test fonksiyonu olarak değişken boyutlu fonksiyonlar kapsamında f_1 fonksiyonu unimodal (Elliptic Fonksiyon), f_2 - f_7 arası fonksiyonlar multimodal (Non-Continuous Rastrigin, Alpine, Levy, Weierstrass, Michalewicz, Dixon&Price Fonksiyonları) ve sabit boyutlu fonksiyonlar kapsamında ise f_8 - f_{10} arası fonksiyonlar (Schaffer, Himmelblau ve Kowalik Fonksiyonları) olmak üzere 10 adet test fonksiyonu seçilmiştir. Seçilen fonksiyonların grafikleri, temel özellikleri ve eşitlikleri aşağıdaki gibi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada yer alan test fonksiyonlarının COA ile çözümünde elde edilen sonuçlarını karşılaştırmak için HHO, CSS ve BSA algoritmaları kullanılmıştır. Algoritmaların performans, yakınsama, kararlılık ve hız açısından değerlendirilmesi için test fonksiyonlarının sonuçlarının değerlendirilmesi, test fonksiyonlarının boyutlarına göre 30, 50, 100 ve sabit boyutlu olmak üzere dört alt başlık altında ayrı ayrı yapılmıştır.

COA algoritmasının performansını en üst düzeye çıkarmak için etkili bir şekilde tahmin edilmesi gereken kerevitlerin farklı sıcaklıklarda besin alımını kontrol etmek için kullanılan σ ve C_l , kerevit için en uygun sıcaklık değerini ifade eden μ değeri ve besin faktörü olup en büyük besini temsil eden C_3 olmak üzere dört adet parametresi vardır. Yapılan çalışmalar sonucunda bu parametrelerin en iyi değerlerinin, σ için 3, C_l için 0,2, μ için 25 ve C_3 için ise 3 olduğu sonucuna varılmıştır [7]. Çalışmada

iterasyon sayısı olarak tüm algoritmalar ve tüm test fonksiyonları için 500 (15000 fonksiyon çağırımı, *FCall*) alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan tüm algoritmalarla ait kullanılan parametre değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Algoritmaların test fonksiyonlarına uygulanması için Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2.30GHz işlemcili ve 6 GB RAM bellekli iş istasyonu kullanılarak MATLAB R2024a’da program geliştirilmiş ve her bir fonksiyon için 30’ar kez koşturulmuştur.

Tablo 1. f_1 - f_{10} fonksiyonlarına ait özellikler

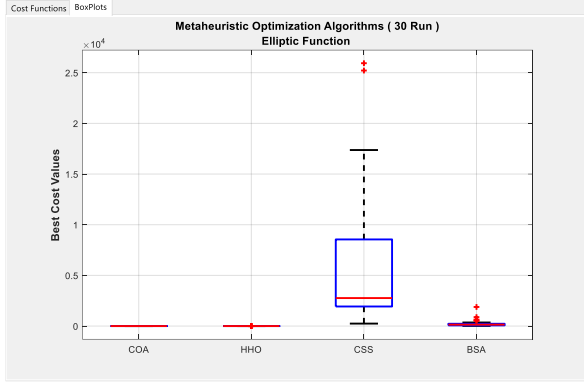
	Boyut Sayısı	Aralık Değerleri	f_{min} Değeri	
Elliptic Function,	30, 50, 100	$(-100, 100)^n$	0	$f_1(x) = \sum_{i=1}^d (10^6)^{\frac{i-1}{d-1}} \times x_i^2$
Non-Continuous Rastrigin Function		$(-5.12, 5.12)^n$	0	$f_2(x) = \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$, $x_i = \begin{cases} \text{eğer } x_i \leq 0.5 \text{ ise} & x_i \\ \text{eğer } x_i > 0.5 \text{ ise} & \text{round}(2 \cdot x_i) / 2 \end{cases}$
Alpine Function		$(-10, 10)^n$	0	$f_3(x) = \sum_{i=1}^d x_i \sin(x_i) + 0.1x_i $
Levy Function		$(-10, 10)^n$	0	$f_4(x) = \sin^2(\pi w_1) + \sum_{i=1}^{d-1} (w_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi w_1 + 1)]$ $+ (w_d - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi w_d)]$ $w_i = 1 + \frac{x_i - 1}{4}$
Weierstrass Function		$(-0.5, 0.5)^n$	0	$f_5(x) = \sum_{i=1}^d \left[\sum_{k=0}^{k_{max}} a^k \cos(2\pi b^k (x_i + 0.5)) \right] - d \sum_{k=0}^{k_{max}} a^k \cos(2\pi b^k)$ $a = 0.5, b = 3, k_{max} = 20$
Michalewicz Function		$(0, \pi)^n$	0	$f_6(x) = -\sum_{i=1}^d \sin(x_i) \cdot \left(\sin\left(\frac{i \cdot x_i^2}{\pi}\right) \right)^{2m}$, $m = 10$
Dixon&Price Function		$(-10, 10)^n$	0	$f_7(x) = (x_1 - 1)^2 + \sum_{i=2}^d i \cdot (2x_i^2 - x_{i-1})^2$
Schaffer Function	2	$(-100, 100)^n$	0	$f_8(x, y) = 0.5 + \frac{\sin^2(x^2 + y^2) - 0.5}{1 + 0.001(x^2 + y^2)^2}$
Himmelblau Function	2	$(-5, 5)^n$	0	$f_9(x, y) = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2$
Kowalik Function	4	$(-5, 5)^n$	$\approx$ 0.000 3075	$f_{10}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{k=1}^{11} \left[a_k - \frac{x_k b_k (b_k + x_2)}{b_k (b_k + x_3) + x_4} \right]^2$, $a = [0.1957, 0.1947, 0.1735, 0.16, 0.0844, 0.627, 0.456, 0.342, 0.323, 0.235, 0.246]$, $b = [0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16]$

Tablo 2. Çalışmada kullanılan algoritmalarla ait parametreler

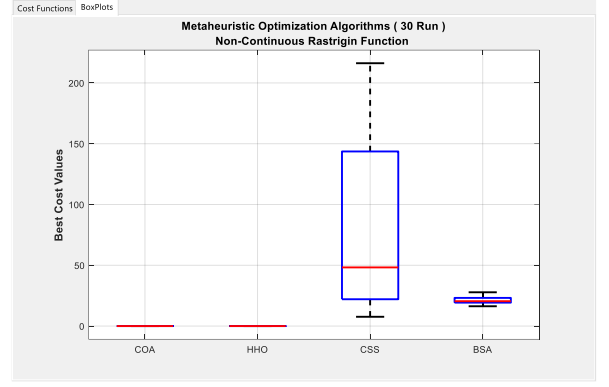
İterasyon sayısı		PopN		FCall		Boyut sayısı	
500		40		15000		2-4-30-50-100	
COA		HHO		CSS		BSA	
σ	3	E	[0,2]	r	0,01	$mixrate$	2
C_1	0,2	J	[0,2]	$Start\ k_v$	0.5		
μ	25			$Finish\ k_v$	0,3		
C_3	3			$Start\ k_a$	0,5		
				$Finish\ k_a$	0,5		

4.1. Boyutu 30 Olan Test Fonksiyonları İçin

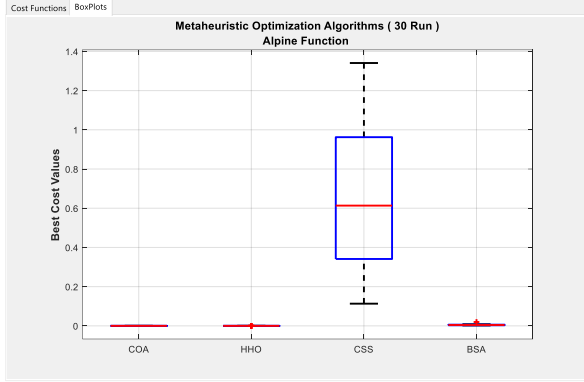
Bu bölümde 30 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonları COA, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30’ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 7-13 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 14-20 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmalarla göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 3’de verilmiştir.



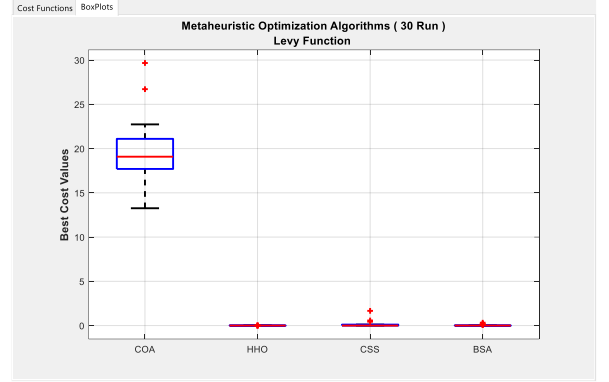
Şekil 7. f1 için kutu grafiği(30-D)



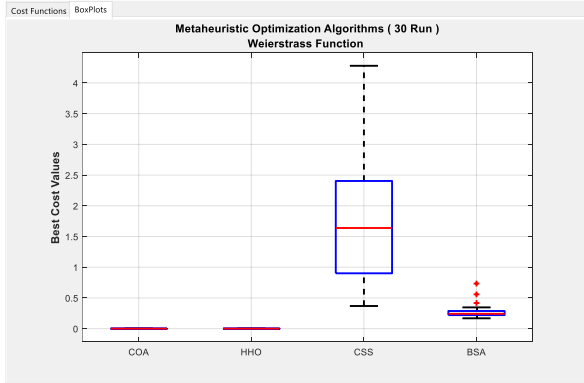
Şekil 8. f2 için kutu grafiği(30-D)



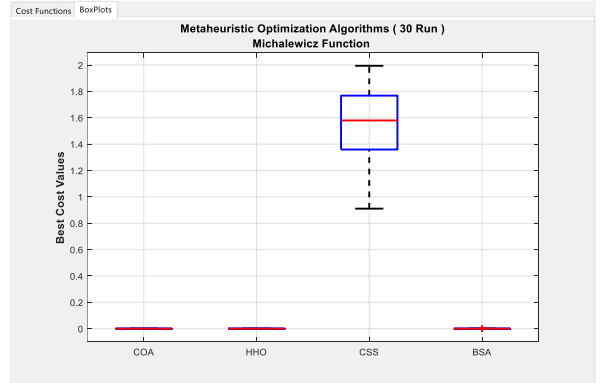
Şekil 9. f3 için kutu grafiği(30-D)



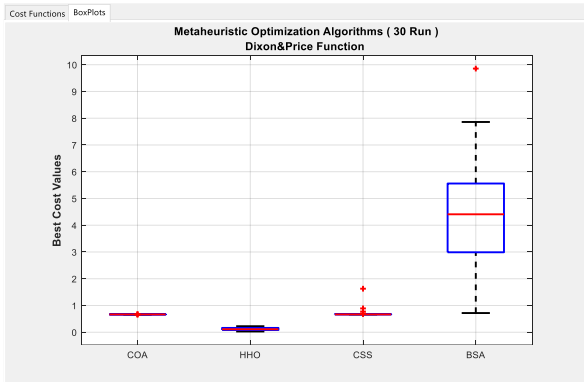
Şekil 10. f4 için kutu grafiği(30-D)



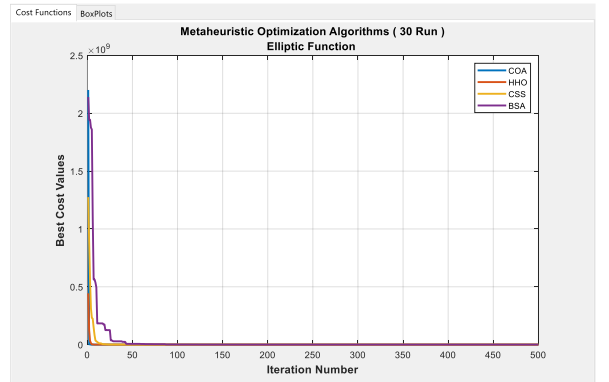
Şekil 11. f5 için kutu grafiği(30-D)



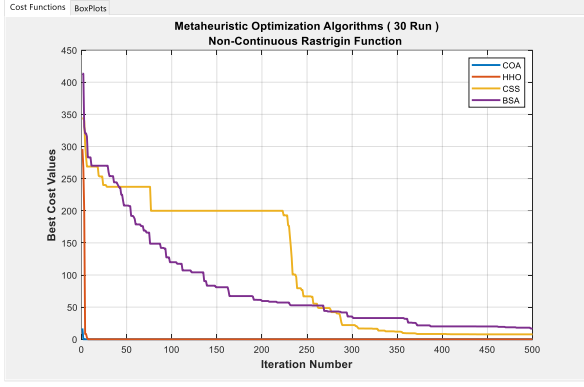
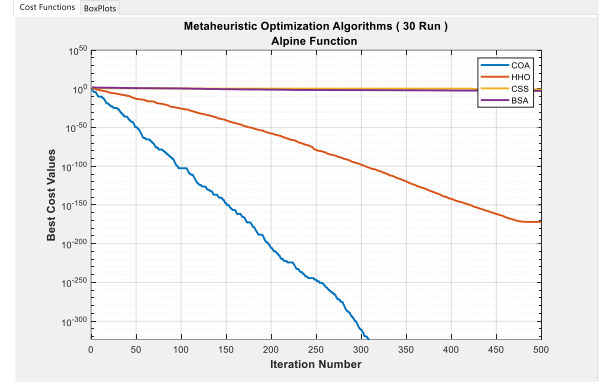
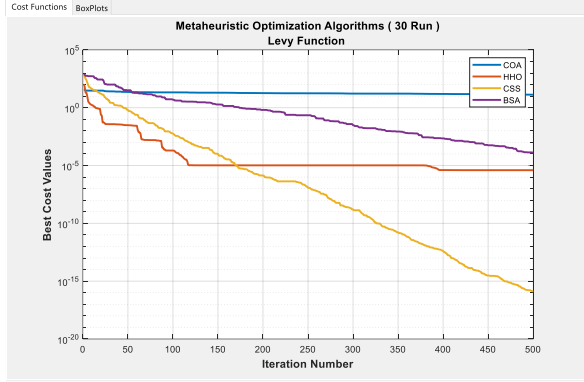
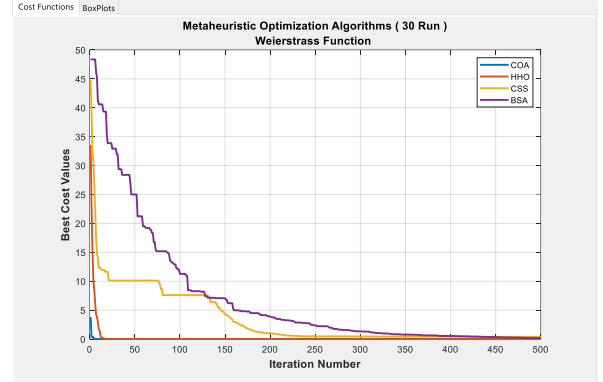
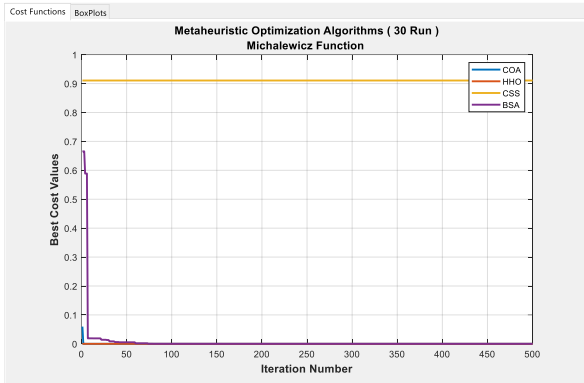
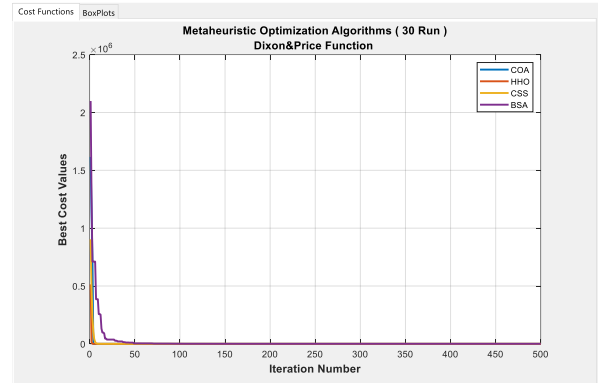
Şekil 12. f6 için kutu grafiği(30-D)



Şekil 13. f7 için kutu grafiği(30-D)



Şekil 14. f1 için yakınsama eğrileri(30-D)

Şekil 15. f_2 için yakınsama eğrileri(30-D)Şekil 16. f_3 için yakınsama eğrileri(30-D)Şekil 17. f_4 için yakınsama eğrileri(30-D)Şekil 18. f_5 için yakınsama eğrileri(30-D)Şekil 19. f_6 için yakınsama eğrileri(30-D)Şekil 20. f_7 için yakınsama eğrileri(30-D)

Şekil 7-20 arası gösterilen 30 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz. f_1 ve f_2 test fonksiyonları için Şekil 7-8'de COA ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 14-15'de ise COA'nın HHO'ya göre daha hızlı bir şekilde yakınsayarak en iyi performansları gösterdiği görülmektedir. f_3 test fonksiyonu için Şekil 9'da COA, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 16'da ise COA'nın HHO'ya göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. f_4 test fonksiyonu için Şekil 10'da HHO algoritmasının en iyi dağılıma sahip olduğu ve Şekil 17'de ise CSS algoritmasının HHO, BSA ve COA'ya göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. f_5 test fonksiyonu için Şekil 11'de COA ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 18'de ise COA algoritmasının en iyi performansı göstererek en iyi yakınsamaya sahip olduğu görülmektedir. f_6 test fonksiyonu için Şekil 12'de COA, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 19'da ise HHO algoritmasının COA'ya göre en az iterasyonla yakınsadığı söylenebilir. f_7 test fonksiyonu için Şekil 13'te COA, HHO ve CSS algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 20'de ise HHO algoritmasının COA'ya göre daha hızlı yakınsadığı ifade edilebilir.

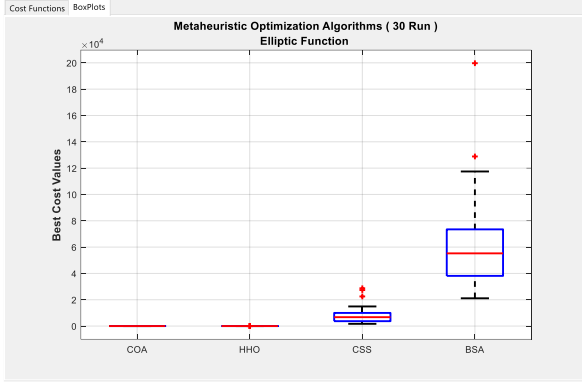
Tablo 3. Algoritmaların 30 Boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

		<i>COA</i>	<i>HHO</i>	<i>CSS</i>	<i>BSA</i>
f_1	EnKötü	0.000000000e+00	3.70795912e-272	2.593443940e+04	1.884212242e+03
	Ortalama	0.000000000e+00	1.23598743e-273	6.016533696e+03	2.545157701e+02
	Enİyi	0.000000000e+00	5.15654145e-298	2.441273321e+02	1.773107676e+01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	6.840519185e+03	3.622092889e+02
	Süre (s)	0.256895	0.211738	0.472049	0.158166
f_2	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.162244480e+02	2.779835658e+01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	7.749024028e+01	2.089370677e+01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	7.640420598e+00	1.630163451e+01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	6.749270924e+01	2.656748937e+00
	Süre (s)	0.0940452	0.167277	0.475873	0.105965
f_3	EnKötü	0.000000000e+00	5.14554882e-157	1.340737322e+00	1.960382296e-02
	Ortalama	0.000000000e+00	3.25080897e-158	6.553980269e-01	5.083291179e-03
	Enİyi	0.000000000e+00	1.31674151e-172	1.131546252e-01	2.038355882e-03
	StdSapma	0.000000000e+00	9.88896553e-158	3.244607945e-01	3.216886321e-03
	Süre (s)	0.15302	0.0967534	0.373527	0.113696
f_4	EnKötü	2.966732639e+01	7.149647793e-03	1.664973966e+00	3.247722878e-01
	Ortalama	1.927885845e+01	8.214041140e-04	1.258813204e-01	3.014839083e-02
	Enİyi	1.325766679e+01	3.956924182e-06	1.211753808e-16	1.329231841e-04
	StdSapma	3.307148960e+00	1.584175480e-03	3.130086335e-01	6.827050649e-02
	Süre (s)	0.126064	0.230745	0.462959	0.0940044
f_5	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.279579138e+00	7.339623406e-01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.751326142e+00	2.783378629e-01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	3.684543025e-01	1.684119921e-01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	9.606739882e-01	1.129142690e-01
	Süre (s)	3.19492	3.53288	2.09585	1.81953
f_6	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.994312920e+00	2.492185246e-08
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.548527086e+00	8.307286831e-10
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	9.106032516e-01	1.434947756e-23
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.966525027e-01	4.473609377e-09
	Süre (s)	0.256032	0.376848	0.489844	0.197483
f_7	EnKötü	6.666723995e-01	2.250845284e-01	1.627529292e+00	9.855168948e+00
	Ortalama	6.666717111e-01	1.154940209e-01	7.133118136e-01	4.405471984e+00
	Enİyi	6.66666803e-01	2.882321837e-02	6.666669529e-01	7.178599397e-01
	StdSapma	1.067304732e-06	4.662332810e-02	1.752551541e-01	2.001336416e+00
	Süre (s)	0.0593848	0.135372	0.345279	0.0564814

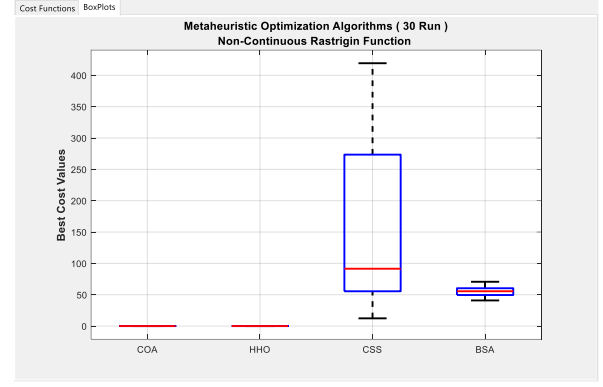
Tablo 3 incelendiğinde COA algoritmasının f_1, f_2, f_3, f_5 , ve f_6 'da en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonlarda ise HHO ve CSS algoritmalarının en iyi değerleri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından ise COA algoritmasının en iyi sürede f_2 'de olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum f_4 için ortalama değerler ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, COA algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu görülmektedir. CSS algoritmalarının en iyi değeri yakaladığı durum f_7 için ortalama değerler açısından karşılaştırıldığında COA algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, COA algoritmasından daha kötü değerlere sahip olduğu görülmektedir.

4.2. Boyutu 50 Olan Test Fonksiyonları İçin

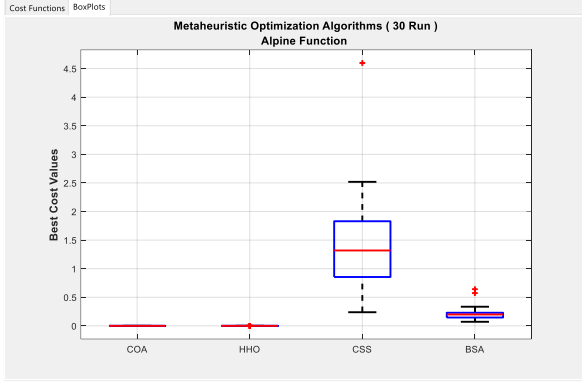
Bu bölümde 50 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonları COA, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 21-27 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 28-34 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmaların göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 4'te verilmiştir.



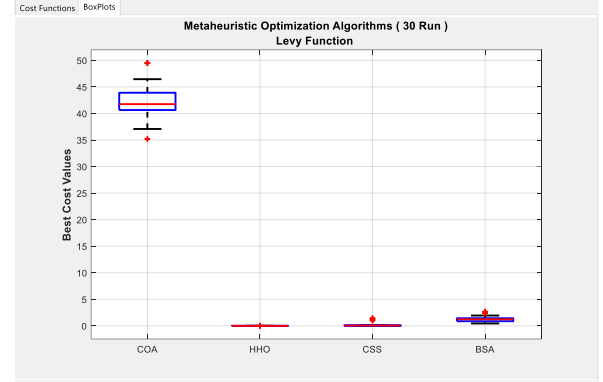
Şekil 21. f1 için kutu grafiği(50-D)



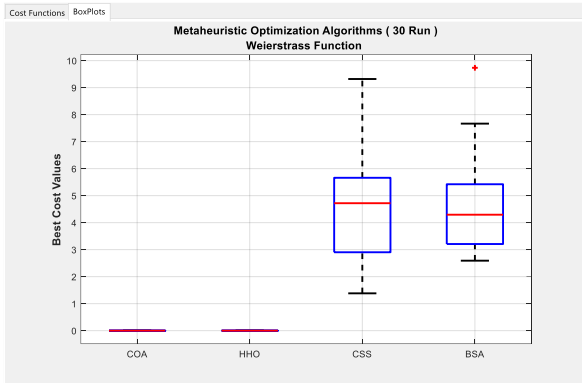
Şekil 22. f2 için kutu grafiği(50-D)



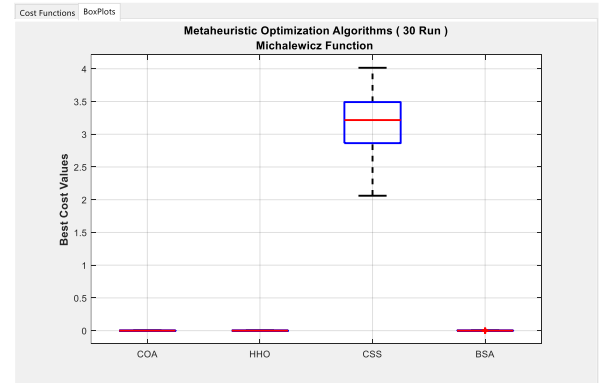
Şekil 23. f3 için kutu grafiği(50-D)



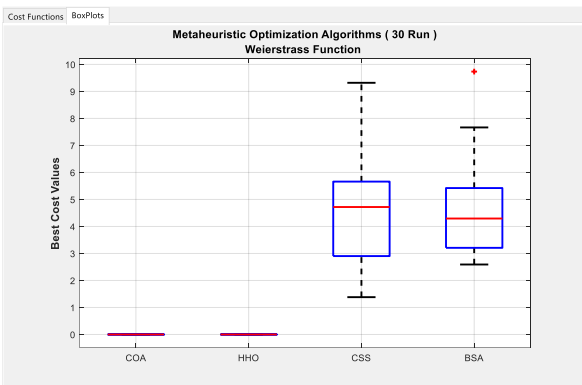
Şekil 24. f4 için kutu grafiği(50-D)



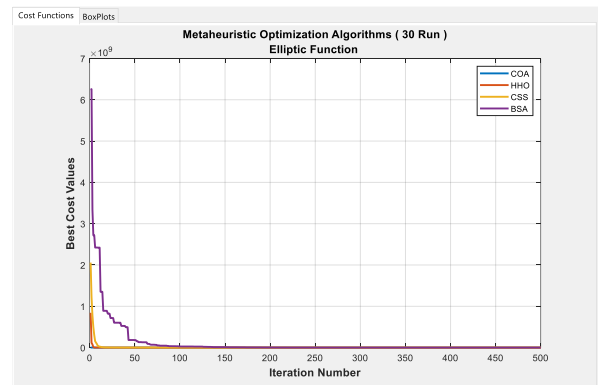
Şekil 25. f5 için kutu grafiği(50-D)



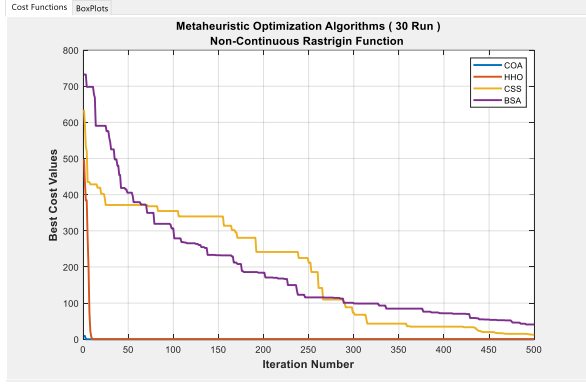
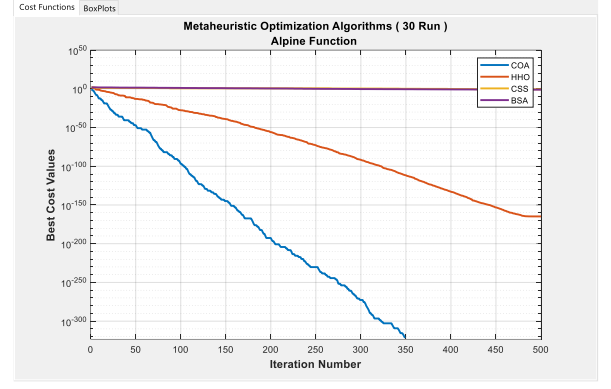
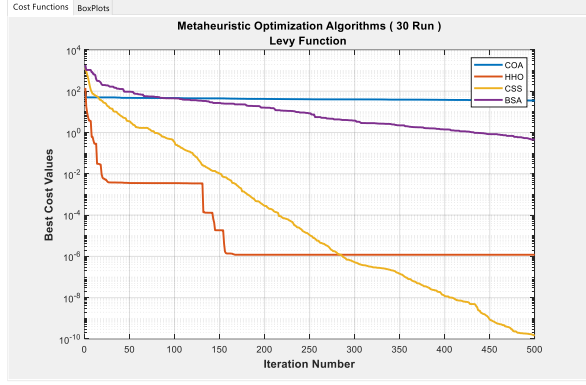
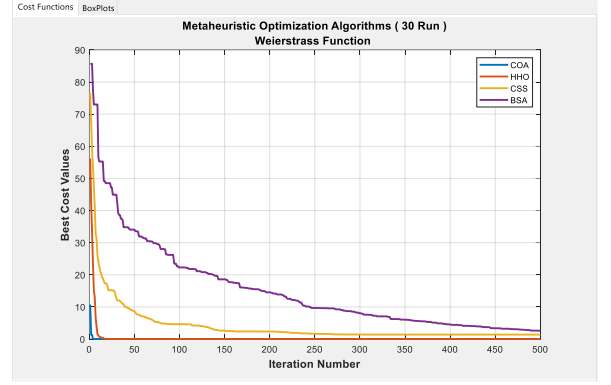
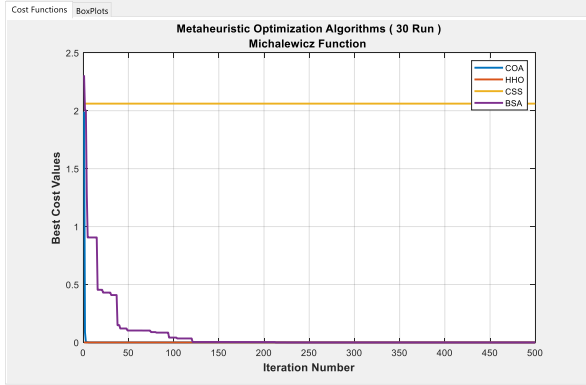
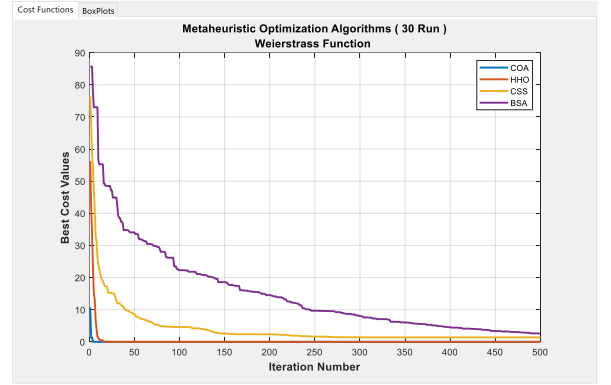
Şekil 26. f6 için kutu grafiği(50-D)



Şekil 27. f7 için kutu grafiği(50-D)



Şekil 28. f1 için yakınsama eğrileri(50-D)

Şekil 29. f_2 için yakınsama eğrileri(50-D)Şekil 30. f_3 için yakınsama eğrileri(50-D)Şekil 31. f_4 için yakınsama eğrileri(50-D)Şekil 32. f_5 için yakınsama eğrileri(50-D)Şekil 33. f_6 için yakınsama eğrileri(50-D)Şekil 34. f_7 için yakınsama eğrileri(50-D)

Şekil 21-34 arası gösterilen 50 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek şu değerlendirmeleri yapabiliriz. f_1 ve f_2 test fonksiyonları için Şekil 21-22'de COA ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 28-29'da ise COA'nın HHO'ya göre daha hızlı bir şekilde yakınsayarak en iyi performansları gösterdiği görülmektedir. f_3 test fonksiyonu için Şekil 23'te COA ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 30'da ise COA'nın HHO'ya göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. f_4 test fonksiyonu için Şekil 24'de HHO algoritmasının en iyi dağılıma sahip olduğu ve Şekil 31'de ise CSS algoritmasının HHO, BSA ve COA'ya göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. f_5 test fonksiyonu için Şekil 25'de COA ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 32'de COA algoritmasının en iyi performansı göstererek en iyi yakınsamaya sahip olduğu görülmektedir. f_6 test fonksiyonu için Şekil 26'da COA, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 33'te ise HHO algoritmasının COA'ya göre daha iyi yakınsadığı söylenebilir. f_7 test fonksiyonu için Şekil 27'de COA ile HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 34'te ise COA algoritmasının HHO'ya göre daha hızlı yakınsadığı ifade edilebilir.

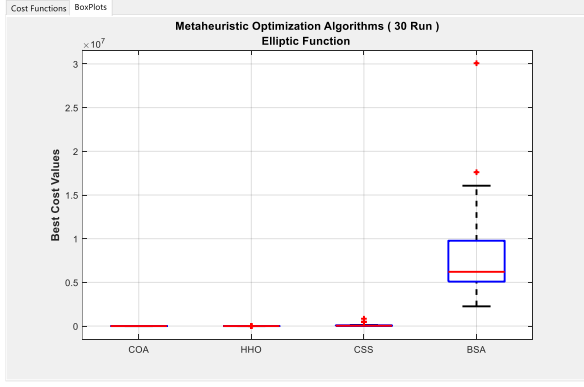
Tablo 4. Algoritmaların 50 Boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

		<i>COA</i>	<i>HHO</i>	<i>CSS</i>	<i>BSA</i>
f_1	EnKötü	0.000000000e+00	6.41821678e-277	2.871426770e+04	1.996977551e+05
	Ortalama	0.000000000e+00	2.20543306e-278	8.524039799e+03	6.290995202e+04
	Enİyi	0.000000000e+00	2.17773195e-296	1.697173203e+03	2.110301964e+04
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	6.795176549e+03	3.691009619e+04
	Süre (s)	0.471005	0.351729	0.637389	0.267548
f_2	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.193025502e+02	7.066658934e+01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.573648572e+02	5.548026066e+01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.232521178e+01	4.088485310e+01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.351401446e+02	7.210412241e+00
	Süre (s)	0.182929	0.438639	0.778613	0.197815
f_3	EnKötü	0.000000000e+00	2.58990167e-156	4.597241239e+00	6.412854319e-01
	Ortalama	0.000000000e+00	2.74891215e-157	1.392081202e+00	2.096120013e-01
	Enİyi	0.000000000e+00	1.71220704e-165	2.383582911e-01	7.118716159e-02
	StdSapma	0.000000000e+00	5.88289395e-157	8.580532196e-01	1.223659873e-01
	Süre (s)	0.206014	0.119756	0.526845	0.131693
f_4	EnKötü	4.949886465e+01	8.679383717e-03	1.441088269e+00	2.668654382e+00
	Ortalama	4.221783959e+01	8.525003795e-04	1.655641668e-01	1.282638371e+00
	Enİyi	3.518430004e+01	1.199906907e-06	1.475388260e-10	4.569776301e-01
	StdSapma	3.207264279e+00	1.792242215e-03	3.586133844e-01	5.898837705e-01
	Süre (s)	0.157499	0.384402	0.538354	0.157207
f_5	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	9.318741365e+00	9.734084080e+00
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.578699805e+00	4.603357036e+00
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.381571537e+00	2.590997463e+00
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.722825154e+00	1.617311691e+00
	Süre (s)	5.16284	6.3429	3.4381	2.81924
f_6	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.015088642e+00	3.324551946e-05
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	3.154592879e+00	4.914669733e-06
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.060935886e+00	1.497777627e-16
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	4.645106288e-01	8.646844487e-06
	Süre (s)	0.436154	1.04624	0.745826	0.327373
f_7	EnKötü	6.666934079e-01	2.497433539e-01	5.248177066e+00	1.326534283e+02
	Ortalama	6.666766758e-01	1.629861398e-01	8.463822177e-01	4.607752485e+01
	Enİyi	6.666674653e-01	7.391894133e-02	6.666703273e-01	2.138019777e+01
	StdSapma	7.824743661e-06	4.287515677e-02	8.193092468e-01	2.134020147e+01
	Süre (s)	0.0834142	0.242556	0.517351	0.078468

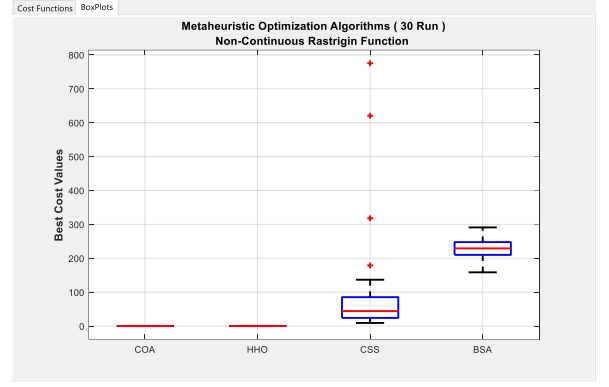
Tablo 4 incelendiğinde COA algoritmasının f_1, f_2, f_3, f_5 ve f_6 'da en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonlarda ise HHO ve CSS algoritmalarının en iyi değerleri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından da COA algoritmasının en iyi sürede f_2 'de olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum f_4 için ortalama değerler ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, COA algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu görülmektedir. CSS algoritmalarının en iyi değeri yakaladığı durum f_7 için ortalama değerler açısından karşılaştırıldığında COA algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, COA algoritmasından daha kötü değerlere sahip olduğu görülmektedir.

4.3. Boyutu 100 Olan Test Fonksiyonları İçin

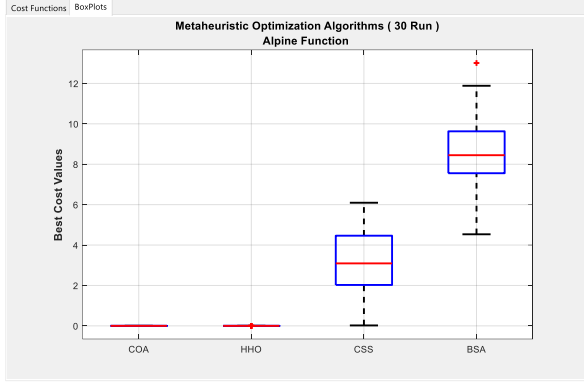
Bu bölümde 100 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonları COA, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 35-41 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 42-48 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmalara göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 5'te verilmiştir.



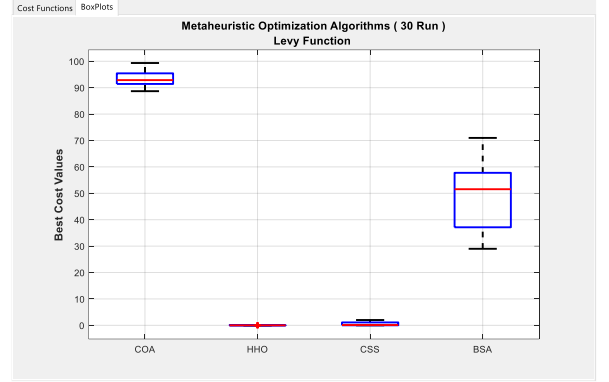
Şekil 35. f1 için kutu grafiği(100-D)



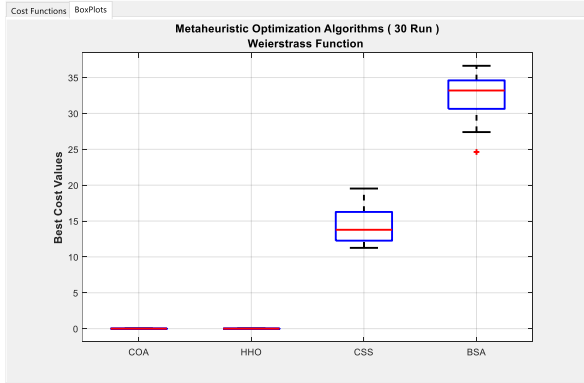
Şekil 36. f2 için kutu grafiği(100-D)



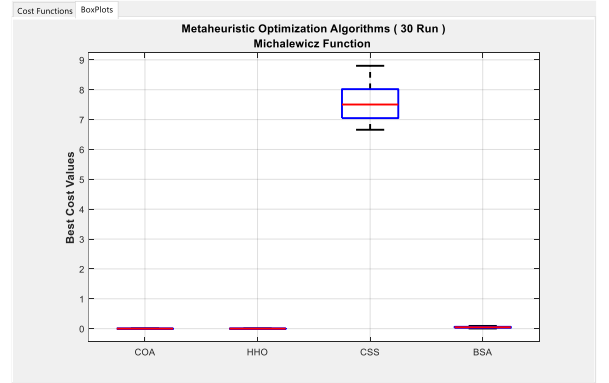
Şekil 37. f3 için kutu grafiği(100-D)



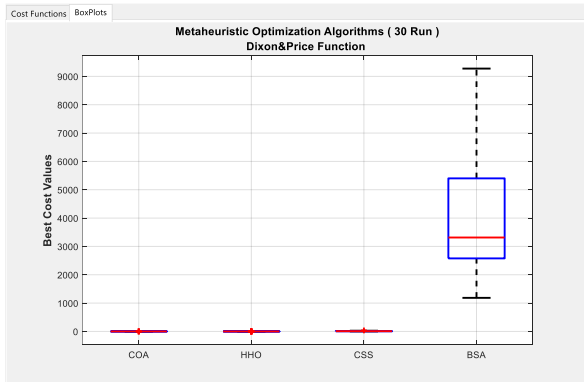
Şekil 38. f4 için kutu grafiği(100-D)



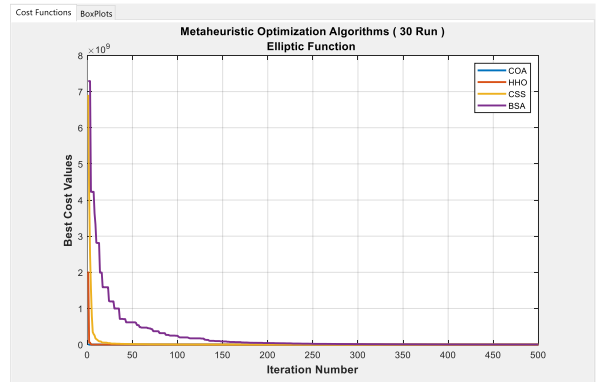
Şekil 39. f5 için kutu grafiği(100-D)



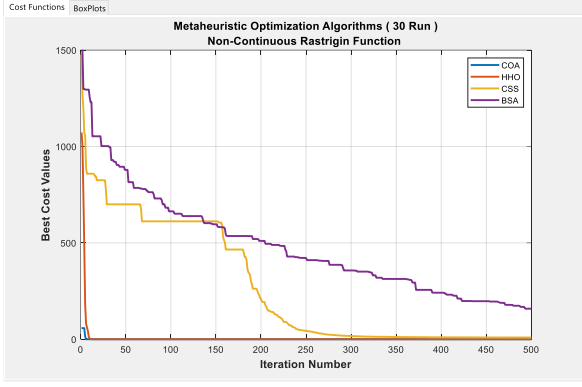
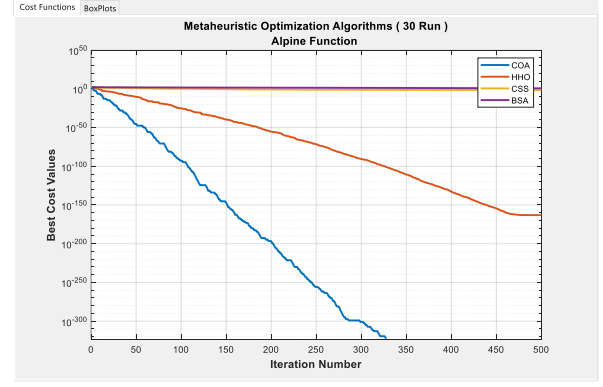
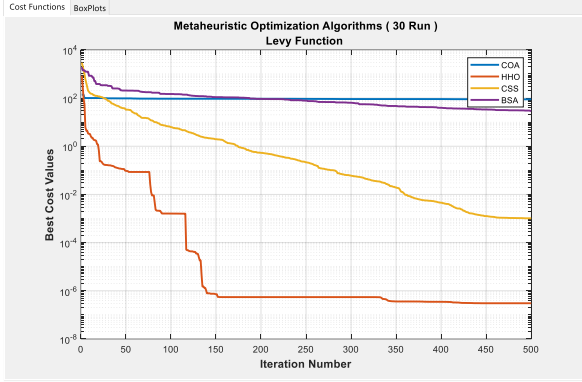
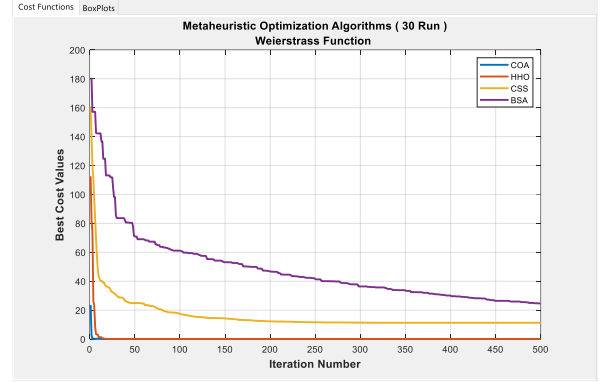
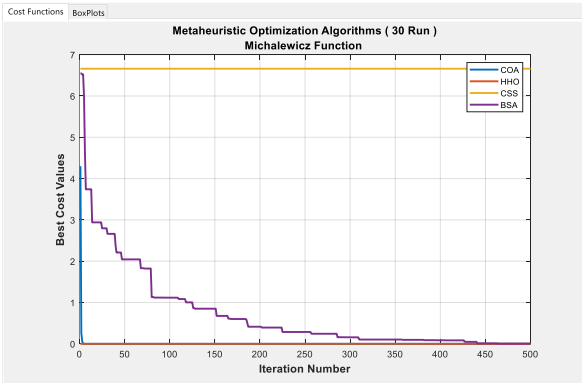
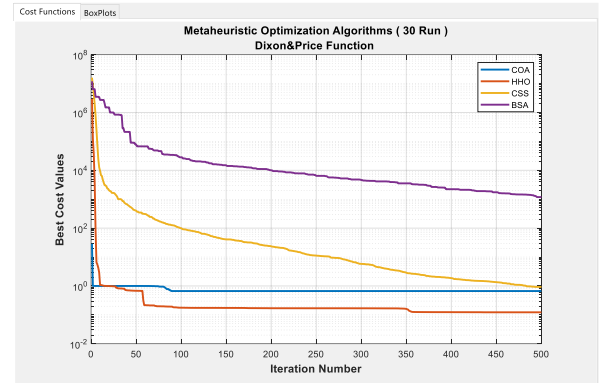
Şekil 40. f6 için kutu grafiği(100-D)



Şekil 41. f7 için kutu grafiği(100-D)



Şekil 42. f1 için yakınsama eğrileri(100-D)

Şekil 43. f_2 için yakınsama eğrileri(100-D)Şekil 44. f_3 için yakınsama eğrileri(100-D)Şekil 45. f_4 için yakınsama eğrileri(100-D)Şekil 46. f_5 için yakınsama eğrileri(100-D)Şekil 47. f_6 için yakınsama eğrileri(100-D)Şekil 48. f_7 için yakınsama eğrileri(100-D)

Şekil 35-48 arası gösterilen 100 boyuttaki f_1 - f_7 arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz. f_1 ve f_2 test fonksiyonları için Şekil 35-36'da COA ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 42-43'te ise COA'nın HHO'ya göre daha hızlı bir şekilde yakınsayarak en iyi performansları gösterdiği görülmektedir. f_3 test fonksiyonu için Şekil 37'de COA ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 44'te ise COA'nın diğer algoritmalarla göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. f_4 test fonksiyonu için Şekil 38'de HHO ve CSS algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 45'de ise HHO, CSS ve BSA algoritmalarının COA'ya göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. f_5 test fonksiyonu için Şekil 39'da COA ve HHO algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 46'da ise COA'nın diğer algoritmalarla göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. f_6 test fonksiyonu için Şekil 40'da HHO, BSA ile COA algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 47'de ise HHO algoritmasının COA'ya göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. f_7 test fonksiyonu için Şekil 41'de COA, HHO ve CSS algoritmalarının iyi bir dağılıma sahip oldukları ve Şekil 48'de ise HHO algoritmasının COA'ya göre daha hızlı yakınsadığı ifade edilebilir.

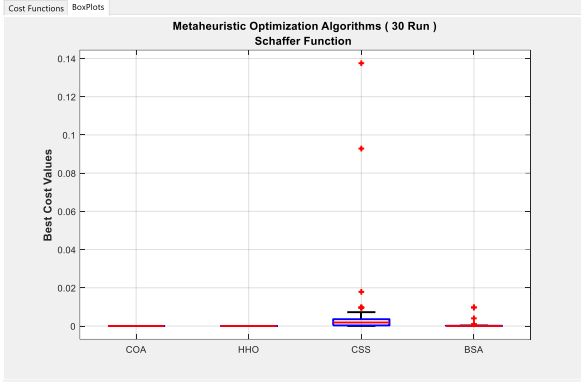
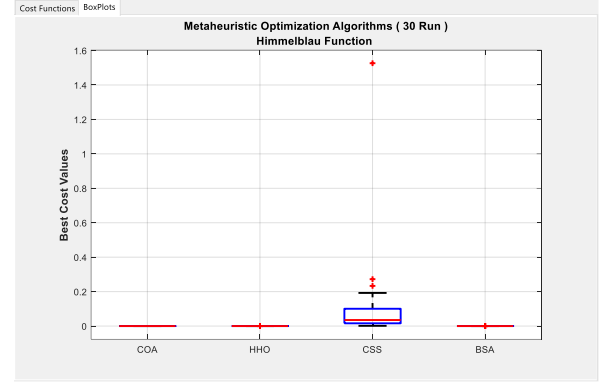
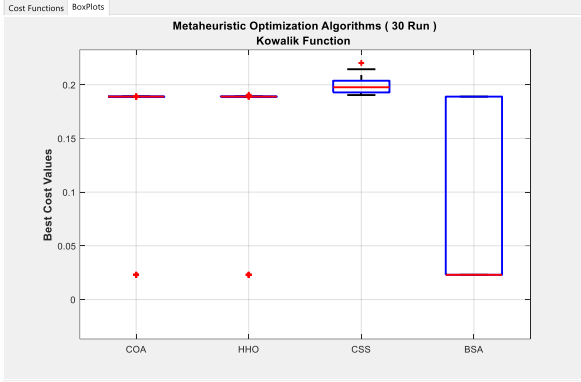
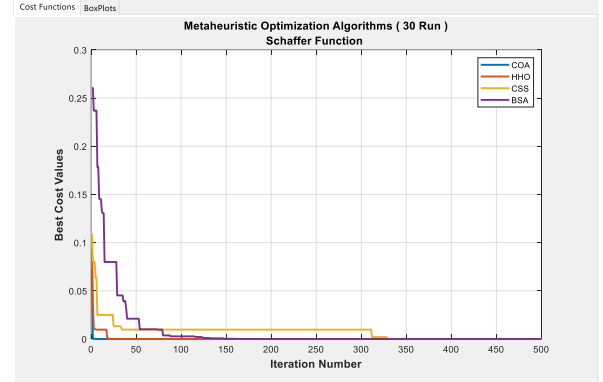
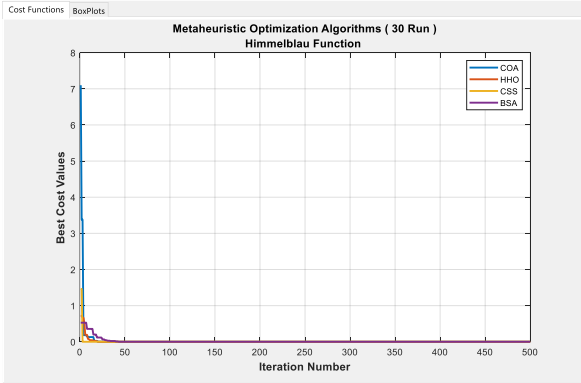
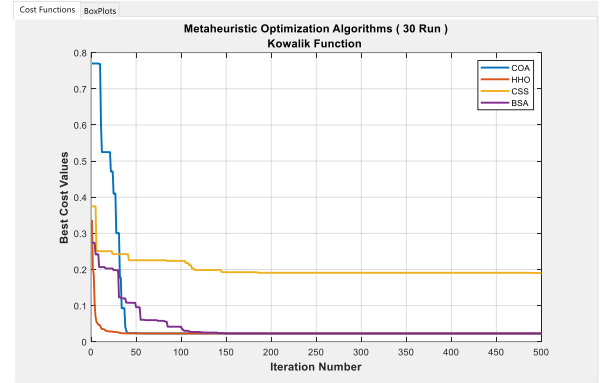
Tablo 5. Algoritmaların 100 Boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

		<i>COA</i>	<i>HHO</i>	<i>CSSJ</i>	<i>BSA</i>
f_1	EnKötü	0.000000000e+00	4.94197136e-276	8.392134107e+05	3.008172789e+07
	Ortalama	0.000000000e+00	1.70090182e-277	1.017145069e+05	8.117098571e+06
	Enİyi	0.000000000e+00	2.27855811e-295	8.149396871e+03	2.257152310e+06
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.773132206e+05	5.553688722e+06
	Süre (s)	0.903167	0.607552	0.903743	0.447395
f_2	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	7.754217525e+02	2.910749230e+02
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.035094238e+02	2.293255475e+02
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	9.142990366e+00	1.585523854e+02
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.714588525e+02	3.282452937e+01
	Süre (s)	0.195455	0.348959	0.619033	0.198577
f_3	EnKötü	0.000000000e+00	1.27449386e-154	6.093792619e+00	1.301058367e+01
	Ortalama	0.000000000e+00	7.49256779e-156	3.206623703e+00	8.549302892e+00
	Enİyi	0.000000000e+00	7.94069719e-164	2.101854071e-02	4.532600510e+00
	StdSapma	0.000000000e+00	2.71506276e-155	1.670842189e+00	1.811710678e+00
	Süre (s)	0.3144	0.12431	0.565801	0.121941
f_4	EnKötü	9.933918986e+01	1.654379434e-02	2.015888167e+00	7.097438424e+01
	Ortalama	9.350822820e+01	1.220085645e-03	5.124034157e-01	4.903051232e+01
	Enİyi	8.867370472e+01	3.046131352e-07	1.018482902e-03	2.898540536e+01
	StdSapma	2.944243084e+00	2.940982370e-03	6.374421062e-01	1.207821902e+01
	Süre (s)	0.215774	0.41846	0.624653	0.17086
f_5	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.952937480e+01	3.663805112e+01
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.428026756e+01	3.255078018e+01
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.125964899e+01	2.462647426e+01
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.415380110e+00	2.888057420e+00
	Süre (s)	9.12338	10.1082	5.44946	4.96749
f_6	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	8.801297790e+00	9.096605556e-02
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	7.552437615e+00	4.562120093e-02
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	6.659663915e+00	5.905831101e-03
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	5.942220006e-01	2.107831378e-02
	Süre (s)	0.795862	1.12568	1.01241	0.581091
f_7	EnKötü	6.670067579e-01	2.508023605e-01	3.567204171e+01	9.275321920e+03
	Ortalama	6.667310859e-01	1.803532231e-01	1.047601157e+01	4.037083487e+03
	Enİyi	6.666766668e-01	1.227066305e-01	9.270521615e-01	1.184919624e+03
	StdSapma	6.842054084e-05	3.725655588e-02	8.010874527e+00	2.091156085e+03
	Süre (s)	0.152208	0.289212	0.651036	0.116422

Tablo 5 incelendiğinde COA algoritmasının f_1, f_2, f_3, f_5 ve f_6 'da en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonlarda ise HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından da COA algoritmasının en iyi sürede f_2 'de olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum f_4 'de ortalama değerler ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, COA algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu görülmektedir. HHO algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum f_7 'de ortalama değerler açısından karşılaştırıldığında COA algoritmasından daha iyi değerlere sahip olduğu ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise, COA algoritmasından daha kötü değerlere sahip olduğu görülmektedir.

4.4. Sabit Boyutlu Test Fonksiyonları İçin

Bu bölümde 2 boyuttaki f_8 ve f_9 , 4 boyuttaki f_{10} test fonksiyonları COA, HHO, CSS ve BSA algoritmalarıyla 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen kutu grafikleri Şekil 49-51 arası ve yakınsama eğrileri ise Şekil 52-54 arasında gösterilmiştir. Tüm algoritmalarla göre bulunan sonuçlar en kötü, ortalama, en iyi, standart sapma ve süre olarak Tablo 6'da verilmiştir.

Şekil 49.1 f_8 için kutu grafiği(2-D)Şekil 50. f_9 için kutu grafiği(2-D)Şekil 51. f_{10} için kutu grafiği(4-D)Şekil 52. f_8 için yakınsama eğrileri(2-D)Şekil 53. f_9 için yakınsama eğrileri(2-D)Şekil 54. f_{10} için yakınsama eğrileri(4-D)

Şekil 49-54 arası gösterilen sabit boyuttaki f_8 - f_{10} arası test fonksiyonlarının kutu grafikleri ve yakınsama eğrilerini birlikte inceleyerek aşağıdaki değerlendirmeleri yapabiliriz. f_8 test fonksiyonu için Şekil 49'da COA ve HHO algoritmalarının diğerlerine göre iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 52'de ise COA'nın HHO'ya göre daha hızlı bir şekilde aynı değere yakınsadıkları görülmektedir. f_9 test fonksiyonu için Şekil 50'de COA, HHO ve BSA algoritmalarının iyi bir dağılımlara sahip oldukları ve Şekil 53'te ise CSS ve HHO algoritmalarının COA'ya göre daha hızlı ve fakat tüm algoritmaların aynı değere yakınsadıkları söylenebilir. f_{10} test fonksiyonu için Şekil 51'de HHO ve COA algoritmalarının diğerlerinden daha iyi bir dağılıma sahip olduğu ve Şekil 54'te ise HHO algoritmasının COA'ya göre daha hızlı yakınsama değerine sahip olduğu ifade edilebilir.

Tablo 6 incelendiğinde COA algoritmasının f_8 , ve f_9 'da en iyi çözüm noktalarında, diğer fonksiyonda ise BSA algoritmasının en iyi değeri yakaladıkları görülmektedir. Ortalama süre açısından da COA algoritmasının en iyi sürede f_8 , f_9 ve f_{10} 'da olduğu görülmektedir. BSA algoritmasının en iyi değeri yakaladığı durum f_{10} için ortalama değerler açısından karşılaştırıldığında COA algoritmasından daha iyi olduğu ve standart sapmalar açısından karşılaştırıldığında ise COA algoritmasından daha kötü değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Algoritmaların Sabit boyutlu test fonksiyonlarına uygulanması durumunda sonuçları (30 bağımsız çalışma)

		<i>COA</i>	<i>HHO</i>	<i>CSS</i>	<i>BSA</i>
<i>f₈</i>	EnKötü	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.375220729e-01	9.715909878e-03
	Ortalama	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.050293825e-02	8.638555997e-04
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	3.300863938e-05	0.000000000e+00
	StdSapma	0.000000000e+00	0.000000000e+00	2.884166951e-02	2.478597898e-03
	Süre (s)	0.0403364	0.0820939	0.261233	0.0408193
<i>f₉</i>	EnKötü	7.888609052e-31	1.577721810e-29	1.526359564e+00	1.959677532e-22
	Ortalama	3.418397256e-31	1.367358902e-30	1.134555325e-01	6.589065130e-24
	Enİyi	0.000000000e+00	0.000000000e+00	1.416855131e-03	0.000000000e+00
	StdSapma	3.909086816e-31	3.161573252e-30	2.717440129e-01	3.516722141e-23
	Süre (s)	0.0238806	0.065922	0.271835	0.0298616
<i>f₁₀</i>	EnKötü	1.889337932e-01	1.906626048e-01	2.202368095e-01	1.889337486e-01
	Ortalama	1.557456736e-01	1.558400003e-01	1.993740795e-01	8.383816546e-02
	Enİyi	2.299335416e-02	2.299335416e-02	1.903879040e-01	2.299335416e-02
	StdSapma	6.637615971e-02	6.642365387e-02	7.703616069e-03	7.996574845e-02
	Süre (s)	0.0297623	0.0764176	0.264134	0.0380855

5. Sonuçlar

Bu çalışmada doğadaki kerevitlerin yiyecek arama, büyük besinleri ayaklarıyla parçalama, yaz tatili için yer arama ve rekabetçi davranışlarından ilham alan, yani doğadan ilham alan yeni bir sürü tabanlı meta-sezgisel algoritma olan COA tanıtılarak çeşitli test fonksiyonları üzerinde uygulanmıştır. Yiyecek arama aşaması ve rekabet aşaması COA'nın kullanım(exploitation) aşamasıdır ve yaz tatili aşaması ise COA'nın keşif aşamasıdır.

MA'lar fizik, evrim, sürü ve insan tabanlı olmak üzere dört farklı ana kategoride oldukları için COA ile elde edilen sonuçlar, HHO, CSS ve BSA algoritmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sürü tabanlı algoritmaya örnek olan COA'ya karşılık çalışmada literatürden karşılaştırmak için seçilen algoritmalar HHO sürü tabanlı, CSS fizik tabanlı ve BSA ise evrim tabanlı algoritmalar. Algoritma seçim işleminde karşılaştırma için seçilen MA'ların bir adedinin aynı tabanlı gruptan diğer ikisinin ise farklı tabanlı gruptan olmasına özen gösterilmiştir.

Çalışmada biri unimodal, altı adedi multimodal olan 7 adet test fonksiyon 30, 50 ve 100 boyutlu ve üç adedi ise sabit boyutlu fonksiyon olmak üzere toplam on adet test fonksiyonu kullanılmıştır. Seçilen 30 ve 50 boyutlu yedi adet test fonksiyonun çözümlerinde en iyi değerlere sahip algoritmalar sırasıyla COA (1 adet unimodal test fonksiyonu), HHO (1 adet multimodal test fonksiyonu) ve CSS (1 adet multimodal test fonksiyonu) olmuştur. Yedi adet test fonksiyonunun 100 boyutlu olması durumunda ise en iyi değerlere sahip algoritmalar sırasıyla COA (1 adet unimodal test fonksiyonu, 4 adet multimodal test fonksiyonu) ve HHO (2 adet multimodal test fonksiyonu) olmuştur. Sabit boyut için yapılan değerlendirmede en iyi değerlere sahip algoritmalar sırasıyla COA (2 adet multimodal test fonksiyonu) ve BSA (1 adet multimodal test fonksiyonu) olmuştur. Çalışmada tüm kutu grafikleri ve yakınsama eğrileri birlikte incelendiğinde sırasıyla COA ve HHO algoritmalarının en başarılı algoritmalar olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre COA algoritmasının şu avantajlara sahip olduğu gözlemlenmiştir; Farklı boyutlardaki optimizasyon problemlerinde yüksek çözüm doğruluğu göstermektedir. Özellikle düşük ve orta boyutlu test fonksiyonlarında hızlı yakınsama sağlamaktadır. Hem keşif (exploration) hem de sömürü (exploitation) aşamalarında dengeli bir performans sergilemektedir. Parametre ayarlarının sayısının az olması uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Algoritmanın bazı dezavantajları da şu şekilde belirtilebilir; Çok yüksek boyutlu problemlerde (özellikle 100 boyut ve üzeri) algoritmanın yakınsama hızı zaman zaman diğer yöntemlere göre daha düşük kalabilmektedir. Yerel minimumlarda takılma riski düşük olmakla birlikte tamamen ortadan kalkmamıştır; bazı fonksiyonlarda erken yakınsama davranışı gözlemlenmiştir. Başlangıç popülasyonu çeşitliliğinin az olması durumunda performans kaybı yaşanabilmektedir. Bu bulgular, COA algoritmasının genel olarak etkili bir optimizasyon yaklaşımı sunduğunu, ancak performansını artırmak için özellikle çok yüksek boyutlu problemlerde adaptif stratejilerle desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, COA algoritmasının çeşitli test fonksiyonları üzerindeki performansını incelemeye yönelik bir ön araştırma niteliğindedir. Gelecekteki çalışmalardan biri, bu algoritmanın elektrik-elektronik mühendisliğinde önemli bir konu olan ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanmasını içerecektir.

Referanslar

- [1] B., Öztürk, L., Uğur, F., Erzincanlı, and Ö. Küçük, "Optimization of Polyethylene Inserts Design Geometry of Total Knee Prosthesis," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 31-39, 2018.
- [2] İ. B., Koç, A. A., Janadi, and V. Ateş, "Interlock Optimization of an Accelerator using Genetic Algorithm," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 1, no. 1, 30-41, 2017.
- [3] Y., Altınok, M., Lüy, N. A., Metin, S., Görgülü Balcı, and F., Acar, "Sustainable Grids: Smart Meter Solutions for Efficient Energy Measurement," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 49-64, 2024. DOI: 10.47897/bilmes.1485662.
- [4] K., Eryılmaz, and A., Elen, "Changes in Traffic Density and Vehicle Usage Habits During and After the Pandemic in Balıkesir Province," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 235-252, 2024. DOI: 10.47897/bilmes.1602255.
- [5] S., Özyön, C., Yaşar, and H., Temurtaş, "Kaos Tabanlı Yerçekimsel Arama Algoritmaları (CbGSA-X) için Test Fonksiyonları," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 8, no. 3, pp. 1771-1793, 2020.
- [6] F. Cantaş, S. Özyön, and C. Yaşar, "Runge Kutta Optimization for Fixed Size Multimodal Test Functions," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 144-155, 2022. DOI: 10.47897/bilmes.1219033.
- [7] H., Jia, H., Rao, C., Wen, and S., Mirjalili, "Crayfish Optimization Algorithm," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56 (Suppl 2), pp. 1919-1979, 2023. DOI: 10.1007/s10462-023-10567-4.
- [8] S., Özyön, C., Yaşar, and H., Temurtaş, "Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Environmental Economic Power Dispatch Problems Consisting of Thermal Units," In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS 2011)*, Electrical & Electronics Technologies Papers, vol. 4, EAE-39, pp. 175-180, Elâzığ, Turkey, May 16-18, 2011.
- [9] D., Aydın, G., Yavuz, S., Özyön, C., Yaşar, and T., Stützle, "Artificial Bee Colony Framework to Non-convex Economic Dispatch Problem with Valve Point Effects," In *Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (GECCO'17)*, pp. 1311-1318, Berlin, Germany, July 15-17, 2017. ISBN: 978-1-4503-4939-0.
- [10] C., Yaşar, and S., Özyön, "A Modified Incremental Gravitational Search Algorithm for Short-term Hydrothermal Scheduling with Variable Head," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 95, pp. 1-17. article 103845, 2020. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103845.
- [11] A., Kaveh, and A., Dadras, "A Novel Meta-heuristic Optimization Algorithm: Thermal Exchange Optimization," *Advances in Engineering Software*, vol. 110, pp. 69-84, 2017. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.03.014.
- [12] S., Özyön, B., Durmuş, G., Kuvat, and G., Özcan, "Yüksek Boyutlu Problemlerin Optimizasyonunda Parametre Seçiminin Genetik Algoritma Performansına Etkileri," In *International Multidisciplinary Congress of Eurasia (IMCOFE'15)*, pp. 842-859, Üsküp, Macedonia, September 1-5, 2015. ISBN: 978-9944-0637-1-5.
- [13] P., Civicioglu, "Backtracking Search Optimization Algorithm for Numerical Optimization Problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 219, no. 15, pp. 8121-8144, 2013. DOI: 10.1016/j.amc.2013.02.017.
- [14] S., Özyön, "Differential Evolution Algorithm with Incremental Social Learning," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 133-163, 2020. DOI: 10.35193/bseufbd.666626.
- [15] S., Özyön, C., Yaşar, and H., Temurtaş, "Harmoni Arama Algoritmasının Çevresel Ekonomik Güç Dağıtım Problemlerine Uygulanması," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 2, pp. 65-76, 2011.
- [16] R. V., Rao, V. J., Savsani, and D. P., Vakharia, "Teaching-learning-based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems," *Computer-Aided Design*, vol. 43, no. 3, pp. 303-315, 2011. DOI: 10.1016/j.cad.2010.12.015.
- [17] A. A., Heidari, S., Mirjalili, H., Faris, I., Aljarah, M., Mafarja, and H., Chen, "Harris Hawks Optimization: Algorithm and Applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849-872, 2019. DOI: 10.1016/j.future.2019.02.028.
- [18] O., Akdağ, A., Ateş, and C., Yeroğlu, "Harris Şahini Optimizasyon Algoritması ile Aktif Güç Kayıplarının Minimizasyonu," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 22, no. 65, pp. 481-490, 2020. DOI: 10.21205/deufmd.2020226516.
- [19] A., Kaveh, and S. Talatahari, "A Novel Heuristic Optimization Method: Charged System Search," *Acta Mechanica*, vol. 213, no. 3, pp. 267-289, 2010. DOI: 10.1007/s00707-009-0270-4.
- [20] F. E., Durak, B., Hiçdurmaz, and S., Özyön, "The Design of Bessel Type High-pass Active Filter with Charged System Search Algorithm," *International Scientific and Vocational Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 76-84, 2019.

Performance Optimization of PID Controllers for DC Machine Drives Using PSO, ACO, and Hybrid PSO-ACO Algorithms

Ahmed Emin Yörük ^a, Nuri Alper Metin ^b, Murat Lüy ^{c,1}

^a Electrical - Electronics Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-1372-1734

^b Electrical - Electronics Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-9962-917X

^c Electrical - Electronics Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-2378-0009

Abstract

PID controllers are utilised extensively in the domain of electric motors and drives. The values of the PID controller have a direct impact on the controller's characteristics. Establishing optimal values is imperative to enhance the efficacy of control mechanisms. Consequently, a multitude of optimization algorithms have been developed. Employing these algorithms facilitates the optimisation of the controller's optimal values with greater efficiency, requiring less experience and a shorter timeframe. In this study, the parameters of the PID controller employed in the motor drive developed for a direct current (DC) motor are optimised by three distinct heuristic optimisation methods: The following optimization methods are used: Particle Swarm Optimisation (PSO), Ant Colony Optimisation (ACO), and PSO-ACO, which is a combination of these two methods. The execution of simulations is conducted within the MATLAB environment, with a subsequent comparative analysis of control performances. This study proposes a pioneering optimisation approach that integrates the PSO and ACO algorithms. The PID controller attains the reference value in the most efficient timeframe through this methodology. The simulation results show that the PSO-ACO method demonstrates optimal performance, followed by PSO and ACO.

Keywords: “PID Control, PSO, ACO, PSO-ACO, DC Machine.”

1. Introduction

DC machines are widely used in industry, robotics, and automatic control systems due to their high controllability, linear speed-torque characteristics, and simple structure. Achieving precise and stable control of a DC motor's speed or position requires an effective control mechanism. In this context, Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers, one of the classical control methods, are frequently preferred in DC motor applications due to their simplicity, ease of implementation, and broad applicability. However, the performance of a PID controller depends heavily on the accurate tuning of its parameters (K_p , K_i , K_d). Manual tuning of these parameters can be time-consuming and may limit system performance. To address this issue, heuristic and metaheuristic optimization algorithms have been increasingly adopted to automatically and optimally determine PID parameters, thereby improving performance criteria such as response time, stability, and error levels. Metaheuristic optimization algorithms have demonstrated significant practical applicability in a wide range of industrial domains due to their adaptability, robustness, and capacity to solve complex, nonlinear, and multimodal problems without requiring gradient information. Industries such as manufacturing, energy systems, automotive, aerospace, robotics, and process control frequently encounter high-dimensional optimization challenges where traditional deterministic or analytical approaches become infeasible or inefficient. In such contexts, metaheuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), Genetic Algorithms (GA) enable efficient parameter tuning, design optimization, fault diagnosis, and real-time control. For instance, in motor control applications, metaheuristics are used to optimize PID parameters dynamically, ensuring minimal error, reduced overshoot, and faster response under variable load and environmental conditions. Their ability to escape local minima and explore vast search spaces makes them especially suitable for systems with uncertainty, noise, or dynamic constraints. Furthermore, their algorithmic simplicity and parallelizable structure facilitate easy implementation on embedded systems, industrial controllers, and real-time platforms. As industrial systems increasingly demand autonomous adaptation and data-driven decision-making, the integration of metaheuristic optimization methods continues to gain traction as a key enabler in smart manufacturing and Industry 4.0 frameworks. Closed-loop techniques are used extensively in system control under current

¹ Corresponding Author
E-mail Address: mluy@kku.edu.tr

models. Usually, these configurations include sensors that give real-time feedback on state variables, a controller, and the process to be controlled. These setups seek to minimize the negative consequences of internal dynamics and external disturbances, guaranteeing the system reaches its intended output. Because PID control is so important in preserving control stability, it is extensively used among several techniques in industrial applications, especially for controlling the speed and position of a DC machine [1].

The precision of the proportional (K_p), integral (K_i), and derivative (K_d) gains determines how effective a PID controller is. Many conventional tuning methods depend on time-consuming manual trial-and-error processes that might not produce the best performance. Based on observed oscillatory behavior in the system, one often used technique in literature, the Ziegler–Nichols approach, establishes parameter values [2]. This approach, which assumes linearity, thus has limited relevance in systems with nonlinear or time-varying properties. Heuristic optimization techniques have become valuable tools for automatically tuning PID parameters to solve such constraints. These techniques present a strong substitute in complex control environments since they seek to outperform conventional methods in performance and provide resilience against unforeseen disturbances. This study conducts detailed investigations on tuning a PID control algorithm designed for a DC machine. Ant Colony Optimization (ACO) and Particle Swarm Optimization (PSO) methods were applied separately in the initial phase. Subsequently, a hybrid algorithm named PSO-ACO is developed by combining the strengths of both techniques. The hybrid PSO-ACO approach is designed to combine the global search efficiency of PSO with the local refinement strength of ACO, with the objective of enhancing convergence speed and robustness in controller tuning. Simulation studies carried out in the MATLAB environment compared the performance of the proposed methods based on the ITAE (Integral of Time-Weighted Absolute Error) criterion, with the primary objective of achieving faster convergence to the reference value [3].

1.1. Literature Review

The application of heuristic algorithms to the tuning of PID controllers for direct current (DC) motor control has recently demonstrated a certain degree of success. The responses produced by Yildirim et al. from PSO were both fast and accurate, significantly lowering overshoot and settling time [4]. Utilising a hybrid PSO-MRAC approach, Oche et al. achieved zero overshoot and enhanced resilience under perturbations [5]. Compared to standalone approaches, a more balanced transient response can be achieved by utilizing a GA–PSO hybrid approach proposed by Beremeh et al [6]. By offering lower overshoot and faster settling times in both simulations and hardware implementations, Najem et al. found that ACO outperformed PSO [7]. Güven et al. presented a modified Jellyfish Search method that guarantees almost instantaneous, error-free performance and minimizes ITAE [8]. Finally, Ekinci et al. outperformed conventional methods by applying the Mountain Gazelle Optimizer to reach zero overshoot with a settling time of less than 0.1 seconds [9]. Literature review is given in Table 1.

Table 1. Literature Review

Study (Year)	Optimization Algorithm(s)
[4]	PSO
[5]	PSO-MRAC
[6]	GA–PSO
[7]	ACO, PSO
[8]	Modified Jellyfish Search (JMS)
[9]	Mountain Gazelle Optimizer (MGO)
This Study	PSO, ACO, PSO-ACO

2. Materials and Methods

2.1. System Description

Fig. 1 shows a speed control system for a DC motor where different heuristic optimization approaches help to fine-tune the PID controller's parameters. The system runs by computing the motor's actual speed output against the intended reference speed. The PID controller receives this error and uses its proportional, integral, and derivative components to generate a control signal. The aim is to change the motor's operation so that its speed almost matches the reference input. Above the PID block, three optimization techniques—particle swarm optimization (PSO), ant colony optimization (ACO), and their hybrid PSO-ACO approach—are used to ascertain the most appropriate values for the PID gains. Aiming to minimize the integrity of time-weighted absolute error (ITAE), these techniques use it as the performance criterion to improve dynamic response. By constantly adjusting the control parameters, integrating these algorithms lets the system reach the intended speed with better accuracy and faster response.

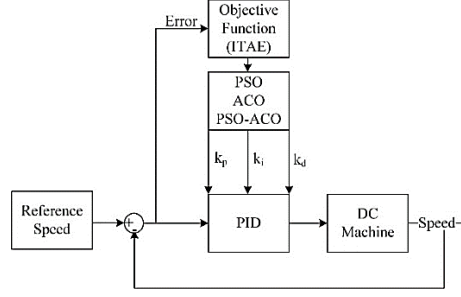


Fig. 1. Block diagram of System Description

2.2. PID Control

The PID control algorithm is a feedback-based control method commonly used in industrial applications. This technique continuously evaluates the difference (error) between the desired system state and the actual measured output, and shapes the control signal accordingly. In the control process, the system output is influenced by three key components—proportional, integral, and derivative—which operate in coordination with one another. The proportional component generates an immediate corrective response proportional to the current error magnitude. The integral component addresses long-term or persistent deviations by calculating the accumulated error over time, thereby helping the system converge to the desired setpoint. On the other hand, the derivative component predicts potential future instability by analyzing the rate of change of the error and contributes to reducing oscillations, particularly during transient responses [10]. The PID control equation is provided in Equation 1.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Fig. 2 shows the basic structure of a PID controller, which functions as a control system. In this system, the error is calculated as the difference between the reference speed and the current speed, and this error passes through three components: Proportional (P), Integral (I), and Derivative (D). Each component processes the error differently: the Proportional component responds based on the magnitude of the error, the Integral component accumulates past errors, and the Derivative component considers the rate of change of the error. Combining these three components generates an appropriate control signal that drives the system output toward the desired value [11].

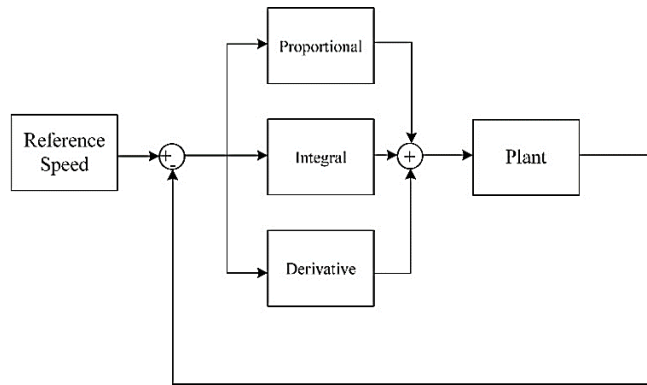


Fig. 2. Block diagram of PID control

2.3. Optimization Methods

Swarm Intelligence refers to the collective behavioral patterns that emerge from individuals acting in harmony with one another. This concept is frequently encountered in artificial intelligence research and was first introduced in 1989 by Gerardo Beni and Jing Wang in the context of cellular robotic systems [12]. Although simple rules guide each agent in such systems and lack predefined instructions for behavior, the overall interactions between individuals result in complex behaviors that can be described as ‘intelligent,’ even if the agents are unaware of the global effect [13]. Numerous swarm intelligence algorithms have been developed by drawing inspiration from nature. These include Stochastic Diffusion Search [14], Ant Colony Optimization (ACO) [15], Particle Swarm Optimization (PSO) [16], Genetic Algorithm (GA) [17], and Differential Evolution Algorithm [18].

2.3.1. Ant Colony Optimization (ACO)

Ant Colony Optimization (ACO) was first proposed in 1992 by Marco Dorigo as part of his doctoral dissertation, initially developed as a heuristic algorithm to find the optimal path between two points. Dorigo introduced this original approach under the name Ant System. In 1999, Hoos and Stützle further refined the algorithm's structure and presented an improved version called the Max-Min Ant System [19]. The ant colony optimization algorithm discussed in this article is also based on the work published by Dorigo and Stützle in 1999 [20]. Dorigo and Stützle later provided a comprehensive overview of the algorithm's detailed structure in a 2004 publication [21].

Regarding the philosophy behind the Ant Colony Algorithm, in 1959, French entomologist Pierre-Paul Grasse observed that ants respond to specific signals he referred to as “significant stimuli.” During his observations, he noticed that the responses of ants to these stimuli could generate new and critical triggers not only for the individuals that produced them but also for other colony members. To define this unique form of communication, which is activated through the actions of worker ants, Grasse introduced the term “stigmergy” [22]. Stigmergy is one of the core concepts of swarm intelligence and refers to an indirect coordination mechanism that arises without direct communication between agents and their actions. Its fundamental principle is that traces left in the environment by one action trigger subsequent actions. The same agent or another independent agent can initiate the follow-up action in this mechanism. As a result, sequential actions are built incrementally, leading to the emergence of coherent and systematic activity patterns. Stigmergy, as a self-organizing approach, enables the formation of complex and intelligent structures without requiring direct communication during planning and control stages. This provides a foundation for effective collaboration, even among simple agents with limited memory or cognitive capacity [23].

A practical example of this natural coordination mechanism can be observed using pheromones within ant colonies. In many ant species, during the food search, ants deposit a chemical substance called pheromone onto the ground; other ants detect this substance and are led to prefer paths with higher pheromone concentrations. Since ants are more likely to choose routes with stronger pheromone trails, more individuals increasingly use these paths. As a result, the pheromone concentration along the selected path intensifies, enabling the colony to identify the most efficient route to the target. The flowchart of the ACO algorithm is illustrated in Fig. 3.

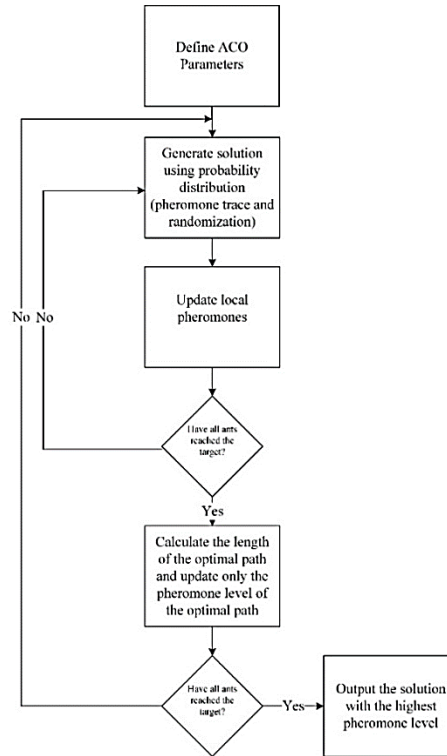


Fig. 3. Flowchart of ACO

The parameters used in the ACO hybrid algorithm are as follows: n is the number of nodes in the problem, m is the number of ants in the system, and d_{ij} is the distance between nodes i and j . T is the number of iterations, and T is the maximum number of iterations. ρ vaporization coefficient, τ_{ij} represents the pheromone density between nodes i and j , and η_{ij} represents the visibility value between nodes i and j . ρ_{ij}^k is the probability that ant k moves from node i to node j , $L^k(t)$ is the distance travelled by ant k in iteration t , and $L_{\text{thebest}}(t)$ is the shortest distance found in iteration t . α is the importance coefficient of pheromone, and β is the importance coefficient of distance. Finally, Q is the pheromone update constant. The ACO algorithm arrives at the result by applying the following procedure: The initial pheromone values m , n , m , d_{ij} , ρ , α , β , Q , and τ_{ij} required for the result

are determined. Ants are placed randomly. All ants complete the cycle to select the next episode based on the local search probability shown in Equation 2 [24].

$$\rho_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (2)$$

The action distance is calculated for each ant in the algorithm. The local pheromone replenishment is given in Equations 3 and 4.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t+1) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t+1) = \begin{cases} \frac{1}{L^k(t+1)} & \text{if ant used path } i-j \\ 0 & \text{another situations} \end{cases} \quad (4)$$

The most accurate result is calculated, and the global pheromone defeat is shown in Equations 5 and 6.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t+1) \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t+1) = \begin{cases} \frac{1}{L_{\text{thebest}}(t+1)} & \text{if it belongs to best tour} \\ 0 & \text{another situations} \end{cases} \quad (6)$$

The cycle continues from step 2 until the maximum number of iterations (T) or another defined qualification criterion is reached.

2.3.2. Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) is a heuristic method developed in 1995 by J. Kennedy and R. C. Eberhart, inspired by the natural behavior of bird flocks [25]. In nature, birds searching for food follow the individual closest to the food source and is considered the leader; however, a new bird that detects the food may take over the leadership. During this process, the communication among birds becomes a fundamental component of identifying the leader and maintaining coordination within the flock. Each bird represents a particle in the algorithm, and its current position corresponds to a potential solution to the target function. As the birds move, every position they occupy is evaluated, and the fitness value of the resulting solution is determined. This fitness value acts as a measure of proximity to the desired result. If a satisfactory solution is found according to predefined criteria, the search process is terminated; otherwise, particles continue to explore the search space to find the optimal value. The general block diagram of PSO is presented in Fig. 4 [26].

Before the algorithm starts, a swarm is initialized, and each particle is assigned an initial velocity and position. Within this swarm, the initial leader is identified. Particles move within a defined velocity range and update their positions each iteration. This velocity parameter can be constant or dynamic. At every new position, the objective function is evaluated for all particles, and a new leader representing the best solution is designated. The leader's position is checked to determine whether it meets the optimization criteria; if so, the search process is completed. If not, the particles continue moving through the search space [27].

What distinguishes PSO from classical optimization techniques is its simplicity, stemming from the limited number of parameters to be adjusted and the fact that it does not require derivative information. The process begins with a randomly generated initial swarm, defined by position, velocity, and direction data. The fitness value for each particle in the swarm is computed. Each particle's best position is recorded based on its own experiences. The best global position within the entire swarm is selected among these individual results. Velocity and position are updated based on previous steps. The process is terminated if the target is deemed reached; otherwise, the algorithm iterates, starting again from step two. The PSO flowchart is shown in Fig. 4 [28].

At the core of this methodology lies the concept of a swarm, with particles representing individual members within it. Each particle repositions itself reactively to align with the optimal location within the collective, drawing on its previous experiential performance. Taking the currently best-optimized position in the swarm as a reference, all other particles update their motion vectors accordingly. The acceleration dynamics of this approach evolve based on randomness and are typically characterized by an iterative process in which particles tend to move toward positions superior to those they have previously attained. This process is repeated until the final objective is achieved.

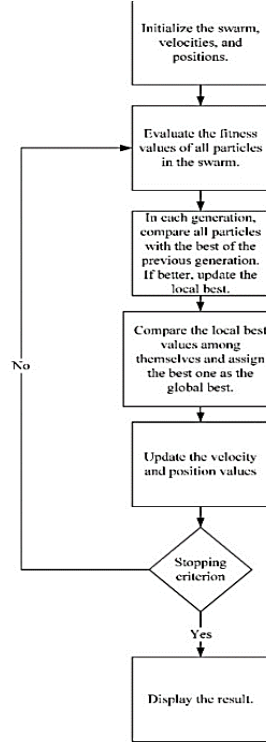


Fig. 4. Flowchart of PSO

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1 \text{rand} \frac{(p^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 \text{rand} \frac{(\rho_k^g - x_k^i)}{\Delta t} \quad (7)$$

Equation 7 gives the velocity (V) equation of the i -th particle at time step $k+1$; here, W represents the inertia weight, c_1 functions as the particle's acceleration coefficient, and c_2 is the social acceleration coefficient associated with the swarm. p^i denotes the best-known position of the respective particle, whereas ρ_k^g indicates the globally best-known position across the entire swarm. These values are multiplied by random scaling factors and added together to compute the particle's next velocity vector. This, in turn, determines the new position, expressed as x_{k+1}^i . The process follows a cyclical structure, following the steps below [29].

2.3.3. PSO-ACO Optimization Algorithm

The PSO-ACO hybrid algorithm introduced in this study distinguishes itself from other hybrid approaches in the literature through its unique integration mechanism, which combines the global search capabilities of Particle Swarm Optimization (PSO) with the local refinement strength of Ant Colony Optimization (ACO) in a complementary and dynamic fashion. Unlike conventional hybrid methods that often operate sequentially or prioritize one algorithm over the other, the proposed method continuously incorporates pheromone-based directional vectors from ACO into the velocity update equation of PSO during each iteration. This allows poorly performing particles not only to be repositioned based on the swarm's best experience but also to be guided by pheromone trails, leading to more efficient exploration and exploitation of the solution space. Additionally, the adaptive ACO sampling applied to underperforming agents enables the algorithm to escape local minima and maintain population diversity. These features result in faster convergence, improved stability, and superior optimization performance compared to other methods that either lack real-time interaction between components or use static hybridization schemes.

PSO-ACO starts with parameters such as population size (n_{Agents}) and number of iterations (n_{Itern}). While the PSO directs the solution search by updating the velocities and positions of each agent with the personal best solution ($p_{\text{Best}(i)}$) and the global best solution (g_{Best}), the ACO marks the good regions in the solution space with pheromones and guides the PSO in these regions. At each iteration, ACO calculates the direction vector and adds it to the PSO's velocity update equation to find the solution more quickly. Pheromone update releases more pheromones for better solutions, which helps to select better paths. Furthermore, ACO sampling is applied for poorly performing agents, allowing these agents to explore different solution paths. As a result, at the end of each iteration, the best solution is updated considering both the cost value and the pheromone contributions [30].

ACO sampling is a technique that enables poorly performing agents to discover new solution paths using pheromones. If an agent's personal best solution ($p_{\text{Best}(i)}$) is twice as poor as the global best solution (g_{Best}), ACO sampling is applied for that agent. The agent is reset in this case, and a new solution is proposed based on the pheromone matrix. This allows agents with

poor performance to explore broader solution spaces and potentially find better outcomes. This method enhances the efficiency of the algorithm and contributes to faster convergence. PSO allows each particle (or agent) to move through the solution space and continue its search for solutions. Each agent updates its new position considering its previous best solution ($p_{Best(i)}$) and the best solution in the population (g_{Best}). The rate update equation of PSO is given in Equation 8.

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{Best(i)} - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{Best} - x_i^t) + c_3 \cdot r_3 \cdot (\tau_{dir} - x_i^t) \quad (8)$$

v_i^t : speed of particle i , x_i^t : current position of particle i , $p_{Best(i)}$: previous best solution of particle i , g_{Best} : global best solution of the population. τ_{dir} : Direction vector suggested by ACO (pheromone contribution), w : Inertia coefficient c_1, c_2, c_3 : Attraction coefficients (for the personal best solution, global best solution, and ACO direction). r_1, r_2, r_3 : Defined as random numbers. PSO aims to reach the optimal point in the solution space by updating the velocity and position of the agents. Here, the direction information (τ_{dir}) provided by the ACO is also added to the update equation of PSO [31].

The PSO-ACO algorithm begins with parameters such as population size (n_{Agents}) and number of iterations (n_{Iter}). While PSO directs the search process by updating each agent's velocity and position based on its personal best solution ($p_{Best(i)}$) and the global best solution (g_{Best}), ACO marks promising regions of the solution space with pheromones and guides PSO towards these regions. In each iteration, ACO computes a direction vector added to the PSO velocity update equation, allowing the solution to be found more rapidly. Pheromone updates deposit more pheromones for better solutions, helping the algorithm prioritize better paths. ACO sampling is also applied to poorly performing agents, enabling them to explore alternative solutions. As a result, at the end of each iteration, the best solution is updated by considering both the cost value and pheromone contributions [32].

2.3.4. Objective Function

In optimization problems, the objective function is the target value that algorithms seek to maximize or minimize to attain a system's best accuracy or performance. Standard metrics include ITAE (Integral of Time-weighted Absolute Error), which evaluates dynamic system performance by penalizing errors more heavily over time; ITSE (Integral of Time-weighted Squared Error), which emphasizes larger errors and promotes faster system stabilization; ISE (Integral of Squared Error), which minimizes the overall error and is effective when minor errors need to be penalized; and IAE (Integral of Absolute Error), which accumulates absolute errors over time to promote smoother responses [33].

These performance functions quantitatively express the amount of error occurring over time. Minimizing these functions during the optimization process means determining the PID controller parameters in a way that ensures system performance with minimal error. The Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) is a commonly used criterion for evaluating the performance of control systems. This method integrates the absolute value of the error multiplied by time, penalizing errors that occur later more heavily. This characteristic helps the system reach a steady state more quickly and with less oscillation. The ITAE criterion is chosen to optimize dynamic performance indicators such as settling time and overshoot. The objective function used is presented in Equation 9 [34].

$$f_{ITAE} = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt \quad (9)$$

2.4. DC Machine

Fig. 5 shows a circuit representing a DC machine's electrical and mechanical model. In the circuit, a series connection is formed with a source U_i resistance R and inductance L . Current I_a flows through this circuit and determines the voltage U_a in the electrical part of the motor. The mechanical part of the motor is characterised by torque T , speed w , and torque J . In addition, b_w (coefficient of friction), a term representing the motor's friction as it rotates, also affects the behaviour of the motor. This circuit is a basic model used for speed control and dynamic analysis of the motor [35].

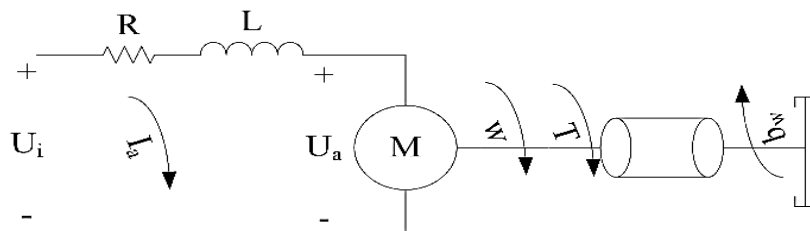


Fig. 5. Circuit of DC Machine

Equations 10 and 11, which describe the dynamic behavior of the DC motor, represent both the electrical and mechanical properties of the motor. Equation 10 describes the rotational motion of the motor, where J is the motor's inertia, b is the viscous friction coefficient, w is the angular velocity, $K_i\alpha$ is the electromagnetic moment, and T is the external load torque. This equation states that the moment produced by the motor must balance the effects of load torque and friction. Equation 11 is based on Kirchhoff's voltage law. It describes how the current through the motor varies with the difference between the applied voltage and the back EMF (K_w), where L is inductance, R is resistance, I_α is current, and U_α is the applied voltage. When used together, Equations 10 and 11 form a basic mathematical model for the control and analysis of the motor [36].

$$J \frac{dw}{dt} + bw = K_i\alpha - T \quad (10)$$

$$L \frac{di_\alpha}{dt} + Ri_\alpha = U_\alpha - K_w \quad (11)$$

3. Simulation Results

In this study, a control system using a PID controller optimised by heuristic techniques aims to control the speed of a DC machine. The process starts with a reference speed, which is mapped to the actual speed of the DC motor to produce an error signal. This error is fed into an objective function such as ITAE (Integral of Time Weighted Absolute Error), which evaluates system performance. Using this error-based performance index, optimisation algorithms such as PSO, ACO, and PSO-ACO repeatedly tune the PID controller parameters K_p , K_i , and K_d . The PID controller uses these optimal values and generates a control signal for the DC machine. The motor's output speed is fed back to the system to form a closed-loop control system to reduce the error and achieve exact speed tracking. This system is designed in the MATLAB environment.

A DC machine's mechanical and electrical characteristics are given in Table 2. Specifying 2.45 ohms, the armature resistance indicates the opposition to current flow within the motor windings. Given as 0.035 H, the inductance reflects the motor's capacity to oppose changes in current. The back EMF constant is 1.2 Vs/rad, representing the voltage produced as the motor shaft rotates. At 0.022 kg·m², the rotor's moment of inertia gauges the motor's resistance to rotational speed changes. Finally, listed as 0.0005 Nms/rad, the damping coefficient characterizes the effect of mechanical friction opposing motion. Designing a reasonable control system and simulating the dynamic behavior of the motor depend on these fundamental values.

Table 2. DC Machine Mechanical and Electrical Characteristics

DC Motor Parameters	Value
Armature Resistance	2.45 Ω
Inductance (L)	0.035 H
EMF Constant (K)	1.2 Vs/rad
Rotor Inertia (J)	0.022 kg·m ²
Friction Coefficient (B)	0.0005 Nms/rad

This study evaluated three different optimization techniques: Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), and a hybrid method combining both, PSO-ACO. Each algorithm was executed over 50 iterations using a population size of 30. The search space is defined by specific upper and lower bounds for a three-dimensional parameter set: [50, 20, 5] as the upper bound and [1, 0.1, 0.1] as the lower bound. Identical experimental conditions were maintained across all algorithms to compare their performances fairly. According to these parameter ranges, the K_p , K_i , and K_d values are given in Table 3.

Table 3. Optimized PID Parameters (K_p , K_i , K_d) for Each Algorithm

Optimization Algorithms	K_p	K_i	K_d
PSO	0.01	10	0.001
ACO	0.01	10	0.0011
PSO-ACO	0.01	10	0.00235065451759030

Fig. 6 shows a three-stage load torque profile that varies over time. Initially, between 0 and 3 seconds, the load torque is approximately 0.05 N·m. Then, from 3 to 6 seconds, the torque increases sharply to around 0.3 N·m. Finally, after 6 seconds, it reaches 0.5 N·m and remains constant at that level. This type of profile is commonly used to evaluate how a system responds to varying load conditions.

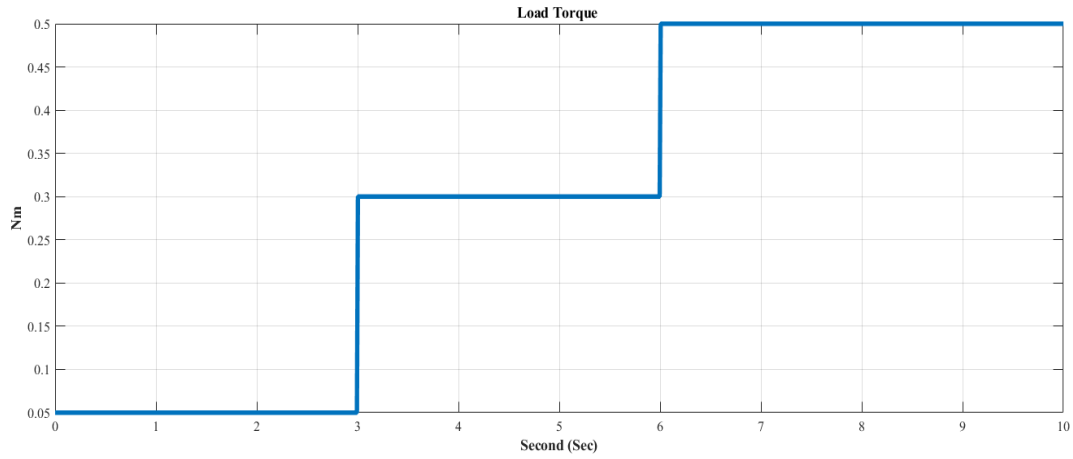
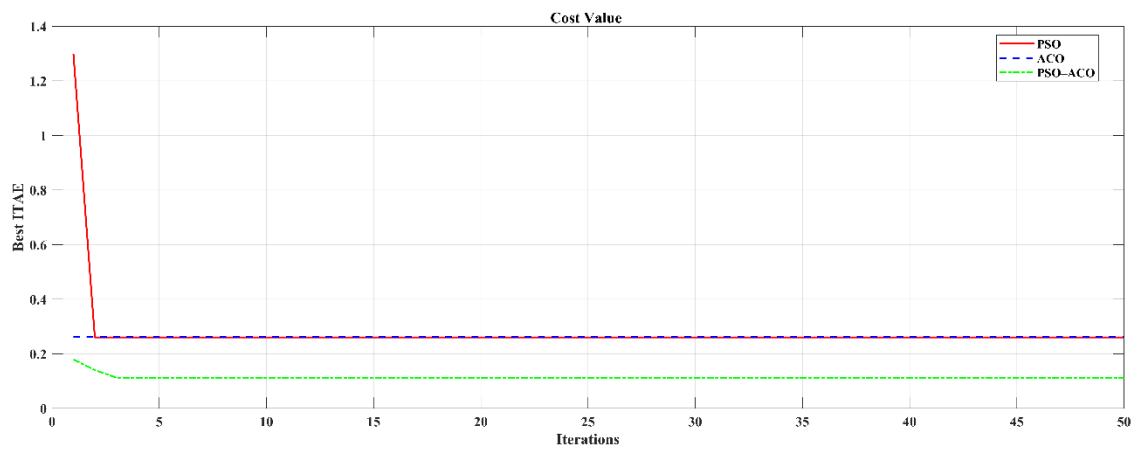


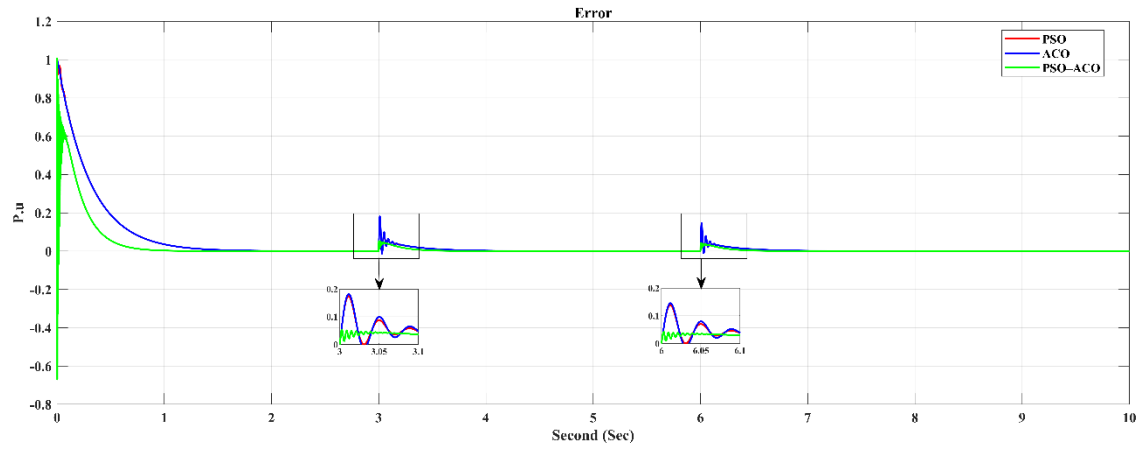
Fig. 6. Time-Varying Load Torque Profile Used for System Evaluation

The performance evaluation based on the speed response, error curve, and cost function results shown in Fig. 7 demonstrates the superior efficiency of the PSO-ACO algorithm in PID parameter optimisation. PSO-ACO reaches the reference speed faster and with fewer overshoots compared to the other methods, PSO and ACO, resulting in a faster and more stable system response. The error curve also supports this advantage and shows that the PSO-ACO algorithm rapidly reduces the tracking error and converges to zero with minimum fluctuation, thus providing high accuracy and control precision. Furthermore, the cost function plot emphasising the excellent convergence efficiency of the PSO-ACO algorithm shows that lower objective function values are achieved in fewer iterations. This performance improvement is due to the capacity of the PSO-ACO algorithm to successfully combine the local refinement capabilities of the ACO method with the global search capabilities of the PSO method. Although PSO effectively avoids local minima by covering large search spaces, it is prone to premature convergence. In contrast, ACO's pheromone-based reinforcement mechanism is particularly effective in improving solutions in promising regions. By harmoniously combining these two complementary behaviours, PSO-ACO can more precisely find and refine high-quality solutions and effectively balance exploration and exploitation. Thanks to this synergy, PSO-ACO demonstrates superior optimisation performance by maintaining population diversity, avoiding stalling, and converging to near-optimal PID parameters more efficiently than individual methods.

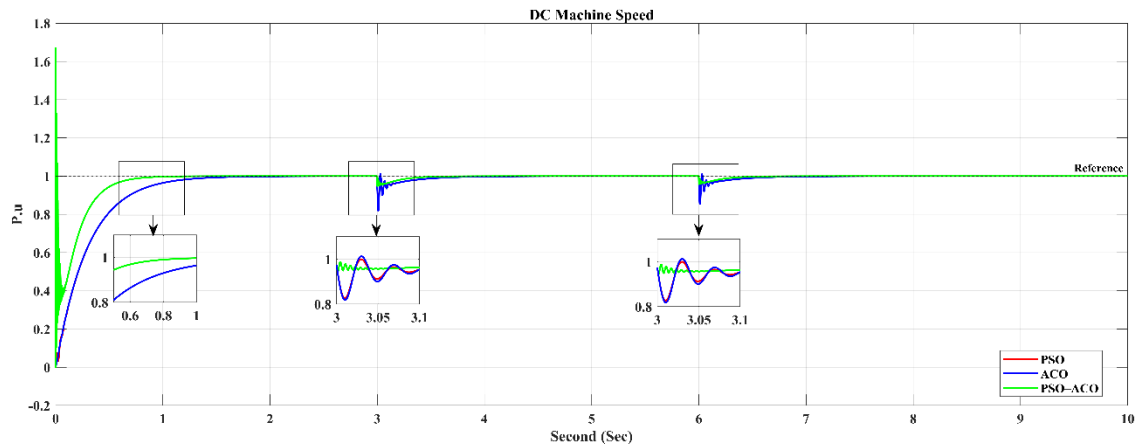
Table 4 compares the control performances of different optimisation algorithms, PSO, ACO, and the combination of these two methods, PSO-ACO. According to the results of the analyses, it is observed that the PSO-ACO algorithm exhibits a significant difference in terms of temporal response characteristics. While PSO and ACO methods generally offer similar performance parameters, the PSO-ACO method shows substantial deviations in specific metrics. When ITAE is considered, it is determined that the PSO-ACO algorithm provides lower error accumulation than other methods. This result indicates that the system can reach the reference value more efficiently. However, the significant overshoot rate observed in the PSO-ACO method suggests that the system response contains faster but more abrupt changes. The time to reach equilibrium for all algorithms is similar, indicating that the control strategies exhibit similar behaviour in terms of stability. However, regarding initial performance and overall system dynamics, it is concluded that the PSO-ACO method outperforms the other two algorithms.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Each optimization algorithm a) Cost vs Iteration, b) Error, c) Speed

Table 4. Optimization Algorithms Performance Values

Optimization Algorithms	ITAE	Final Error	Overshoot	Rise Time
PSO	0.2605	0.0000	0.0000	0.6540
ACO	0.2615	0.0000	0.0129	0.6570
PSO-ACO	0.1130	0.0000	0.6695	0.0010

4. Conclusion

The performance of heuristic optimisation algorithms in tuning PID controller parameters for DC motor speed control is comparatively investigated concerning transient criteria such as overshoot and rise time. DC motors are frequently favoured in industrial contexts due to their linear speed-torque characteristics, high controllability, and wide range of applications. However, implementing an effective control strategy is imperative for the motor to attain the reference speed value with both rapidity and stability. PID controllers assume paramount importance at this juncture due to their uncomplicated configuration. Nevertheless, the efficacy of these controllers is contingent upon the precision of the parameter settings. The simulation results show that heuristic and hybrid optimisation methods, including PSO-MRAC, GA-PSO, and the proposed PSO-ACO, exhibit superior performance compared to classical tuning techniques. In particular, the Mountain Gazelle Optimiser (MGO) algorithm developed by Ekinici et al. (2025) offers a remarkable transient response with zero overshoot and a rise time of 0.0478 seconds [9]. However, the PSO-ACO algorithm developed in this study has been shown to achieve the most successful results, with an extremely low rise time of 0.0010 seconds and a low overshoot rate of 0.6695%. The findings indicate that hybrid swarm intelligence-based optimisation methods can significantly enhance the system's transient response speed and tracking accuracy, particularly in real-time DC motor control applications. Table 5 is given Comparison of Performance of the Study with Heuristic Optimisation Methods in the Literature.

Table 5. Comparison of Performance of the Study with Heuristic Optimisation Methods in the Literature

Study (Year)	Optimization Algorithm(s)	Overshoot (%)	Rise Time (s)
[4]	PSO	1.86%	0.045
[5]	PSO-MRAC (Hybrid)	0%	-
[6]	GA-PSO (Hybrid)	5.29%	0.30
[7]	ACO	0.68%	-
[8]	Modified Jellyfish Search (JMS)	~0%	-
[9]	Mountain Gazelle Optimizer (MGO)	0%	0.0478
This Study (2025)	PSO-ACO (Hybrid)	0.6695%	0.0010

Simulation results confirm that the hybrid PSO-ACO method exhibits superior performance, particularly in terms of rapid convergence and enhanced control precision. A more detailed examination of the transient response characteristics reveals that PSO-ACO effectively minimizes tracking error in the early phase of the system's operation and rapidly stabilizes the motor speed. In real-world control scenarios, such responsiveness is critical for applications requiring high agility and minimal delay, such as robotics, automated manufacturing, or precision motion control systems. The rapid rise time of 0.0010 s achieved by PSO-ACO indicates the algorithm's capacity to initiate control action almost immediately after receiving a reference input, which is a crucial requirement for time-sensitive applications. Additionally, its ability to reduce steady-state error without introducing significant oscillations or prolonged overshoots demonstrates improved robustness in transient conditions. While the overshoot is marginally higher than PSO or ACO alone, the hybrid approach compensates for this by reaching the desired value more quickly and with fewer oscillations during settling. Although PSO offers better exploration capabilities and ACO excels in local solution refinement, the proposed hybrid model successfully merges these advantages to balance exploration and exploitation. Furthermore, the study emphasizes the need for future validation via hardware implementations to assess the real-time performance and robustness of the proposed algorithms under physical uncertainties and disturbances. From a practical standpoint, PSO-ACO appears to be a highly promising candidate for industrial control systems that demand both speed and reliability. Nevertheless, in applications where overshoot must be strictly minimized—such as delicate positioning systems or safety-critical operations—pure ACO or further-tuned hybrid variants may be more appropriate. Ultimately, the choice of optimization approach should consider system constraints, performance priorities, and environmental dynamics.

The PSO-ACO-based optimisation approach developed in this study has been shown to achieve successful results in the context of DC motor speed control. However, subsequent studies are planned to verify the performance of the proposed method by applying it to different motor types (e.g., brushless DC motors or synchronous motors). Furthermore, the objective is to develop more robust control algorithms by considering dynamic effects such as load variations, parameter uncertainties, and external disturbances in motor drive systems. Furthermore, developing more sophisticated hybrid methods is envisaged, combining diverse meta-heuristic algorithms (e.g., Grey Wolf Optimiser, Whale Optimisation Algorithm) within the PSO-ACO framework, complemented by comparative performance analyses. Ultimately, the efficacy and dependability of the algorithm in practical applications will be ascertained through the execution of tests on real-time hardware (HIL- Hardware-in-the-Loop).

References

- [1] H. O. Erkol, "GA ve PSO ile Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu," *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 179–185, 2017.
- [2] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 115, no. 2B, pp. 759–765, 1993.
- [3] R. C. Panda, C. Yu, and H. Huang, "PID Tuning Rules for SOPDT Systems: Review and Some New Results," *ISA Transactions*, vol. 43, no. 2, pp. 283–295, 2004.
- [4] Ş. Yıldırım, M. S. Bingöl, and S. Savaş, "Tuning PID controller parameters of the DC motor with PSO algorithm," *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 281–286, 2024.
- [5] J. E. Oche, H. A. Bashir, and T. J. Shima, "PSO-optimized model reference adaptive PID controller for precise DC motor speed control," *Nigerian Journal of Technological Development*, vol. 21, no. 4, pp. 135–144, Dec. 2024, doi: 10.4314/njtd.v21i4.2473.
- [6] R. C. Beremeh et al., "A hybrid optimization scheme for tuning fractional order PID controller parameters for a DC motor," *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 13, no. 2, pp. 2779–2789, 2024, doi: 10.30574/ijrsra.2024.13.2.2291.
- [7] A. Najem, A. Moutabir, and A. Ouchatti, "Simulation and Arduino hardware implementation of ACO, PSO, and FPA optimization algorithms for speed control of a DC motor," *International Journal of Robotics and Control Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 1186–1206, 2024, doi: 10.31763/ijrcs.v4i3.1483.
- [8] A. F. Güven, O. Ö. Mengi, M. A. Elseify, and S. Kamel, "Comprehensive optimization of PID controller parameters for DC motor speed management using a modified jellyfish search algorithm," *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 46, no. 1, pp. 320–342, Jan. 2025, doi: 10.1002/oca.3218.

- [9] S. Ekinici et al., "Advanced control parameter optimization in DC motors and liquid level systems," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1394, Jan. 2025, Doi: 10.1038/s41598-025-85273-y.
- [10] M. Moghaddas, M. R. Dastranj, N. Changizi, and M. Rouhani, "PID Control of DC Motor Using Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm," *Journal of Mathematics and Computer Science*, vol. 1, no. 4, pp. 386–391, Dec. 2010, doi: 10.22436/jmcs.001.04.16.
- [11] K. J. Åström and T. Hägglund, "The Future of PID Control," *Control Engineering Practice*, vol. 9, no. 11, pp. 1163–1175, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0967-0661(01)00062-4.
- [12] G. Beni and J. Wang, "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems," *Proceedings of NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*, Tuscany, Italy, Jun. 1989.
- [13] P. Erdoğan, "Doğadan Esinlenen Optimizasyon Algoritmaları ve Optimizasyon Algoritmalarının Optimizasyonu," *DÜBİTED*, vol. 4, no. 1, pp. 293–304, 2016.
- [14] J. M. Bishop, "Stochastic Searching Networks," *Proc. 1st IEE Int. Conf. on Artificial Neural Networks*, pp. 329–331, London, UK, 1989.
- [15] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*, Cambridge, MA: MIT Press, 2004.
- [16] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Recent Approaches to Global Optimization Problems Through Particle Swarm Optimization," *Natural Computing*, vol. 1, no. 2–3, pp. 235–306, 2002, doi: 10.1023/A:1016568309421.
- [17] J. Holland, "Genetic Algorithms," *Scientific American Journal*, 1992, pp. 66–72.
- [18] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces," *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997.
- [19] T. Stützle and H. H. Hoos, "MAX–MIN Ant System," 1999.
- [20] M. Dorigo, G. Di Caro, and L. M. Gambardella, "Ant algorithms for discrete optimization," *Artificial Life*, vol. 5, no. 2, pp. 137–172, 1999.
- [21] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*, Cambridge, MA: MIT Press, 2004.
- [22] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stützle, "Ant Colony Optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 28–39, 2006, doi: 10.1109/MCI.2006.329691.
- [23] D. Sandoval, I. Soto, and P. Adasme, "Control of direct current motor using Ant Colony optimization," *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Santiago, Chile, 2015, pp. 79–82, doi: 10.1109/Chilecon.2015.7400356.
- [24] F. Ulu, G. Tabansız Göç, and F. Çavdur, "Floyd-Warshall ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu Algoritmaları ile Depo Rota Planlaması," *Verimlilik Dergisi*, vol. 59, no. 2, pp. 337–354, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1539618>.
- [25] F. Marini and B. Walczak, "Particle Swarm Optimization (PSO): A Tutorial," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 149, pp. 153–165, 2015.
- [26] C. A. Coello Coello and M. Reyes-Sierra, "Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 287–306, 2006.
- [27] M. Lüy and N. A. Metin, "PID Control Medium Size Wind Turbine Control with Integrated Blade Pitch Angle," *International Scientific And Vocational Journal (Isvos Journal)*, vol. 6, no. 1, pp. 22–31, Jun. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47897/bilmes.1091968>
- [28] D. Wang, D. Tan, and L. Liu, "Particle Swarm Optimization Algorithm: An Overview," *Soft Computing*, vol. 22, no. 2, pp. 387–408, 2018, doi: 10.1007/s00500-017-2534-6.
- [29] A. T. Kiani et al., "An Improved Particle Swarm Optimization with Chaotic Inertia Weight and Acceleration Coefficients for Optimal Extraction of PV Models Parameters," *Energies*, vol. 14, no. 11, p. 2980, 2021, doi: 10.3390/en14112980.
- [30] B. Nagaraj and P. Vijayakumar, "A Comparative Study of PID Controller Tuning Using GA, EP, PSO, and ACO," *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 42–48, 2011.
- [31] P. Thakur, J. Mishra, C. Yadav, and K. Tiwari, "PSO–ACO PID Techniques for Stability Enhancement," *International Journal of Novel Research and Development (IJNRD)*, vol. 3, no. 6, pp. 75–80, Jun. 2018.
- [32] N. S. R. Krishnan and D. Devaraj, "Comparison of Bees Algorithm, Ant Colony Optimisation, and Particle Swarm Optimisation for PID Controller Tuning," *Proc. 11th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation*, pp. 1975–1980, 2009, doi: 10.1145/1500879.1500912.
- [33] M. R. H. Mojumder and N. K. Roy, "Review of Meta-Heuristic Optimization Algorithms to Tune the PID Controller Parameters for Automatic Voltage Regulator," *arXiv preprint, arXiv:2409.00538*, Aug. 2024.
- [34] A. Yıldız, M. E. Karşoğlu, and S. Yıldız, "Effects of objective function in PID controller design for an AVR system," *Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 8, no. 2, pp. 398–407, 2020.
- [35] A. A. El-Gammal and A. A. El-Samahy, "A Modified Design of PID Controller for DC Motor Drives Using Particle Swarm Optimization," *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 419–424, Lisbon, 2009.
- [36] "DC Motor Speed: System Modeling," *Control Tutorials for MATLAB and Simulink*, University of Michigan. [Online]. Available: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling>.

Structural Parameters, NLO, HOMO, LUMO, MEP, Chemical Reactivity Descriptors, Mulliken-NPA, Thermodynamic Functions, Hirshfeld Surface Analysis and Molecular Docking of 1,3-Bis(4-methylphenyl)triazine

Hilal Nur Yoğurtçu ^a, Cem Cüneyt Ersanlı ^{b,1}

^a Sinop University, Institute of Graduate Studies, Department of Physics, Sinop, Türkiye
ORCID ID: 0009-0009-9762-5595

^b Sinop University, Faculty of Arts and Science, Department of Physics, Sinop, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-8113-5091

Abstract

In the current study, the molecular geometry, electronic characteristics, nonlinear optical (NLO) properties, and potential biological activity of 1,3-bis(4-methylphenyl)triazene (**I**) were investigated by a combination of experimental crystallographic data and density functional theory (DFT) calculations at the B3LYP/6-311++G(d,p) level. The optimized molecular geometry was in very good agreement with experimental X-ray data, with a low root-mean-square deviation (RMSD) of 0.106 Å, verifying the computational model. The molecule demonstrated high NLO activity, possessing a first-order hyperpolarizability roughly seven times larger than that of urea, and potential application in optoelectronic and photonic devices. Frontier molecular orbital (FMO) calculation demonstrated HOMO–LUMO energy gap of 5.6015 eV in the gas-phase indicating kinetic stability, and solvent-phase calculation indicated higher reactivity and polarity at high-dielectric conditions. Global reactivity descriptors and molecular electrostatic potential (MEP) mapping identified key electrophilic and nucleophilic sites, with implications for the charge distribution of the molecule and probable modes of interaction. Mulliken and natural population analyses (NPA) also revealed electronic behavior, NPA providing more chemically meaningful charge partitioning. Thermodynamic properties -entropy, enthalpy, and heat capacity- exhibited smooth temperature dependence, which established the thermal stability of the compound. Hirshfeld surface and 2D fingerprint plots of the crystal structure highlighted the dominant role played by van der Waals interactions in crystal packing. Molecular docking studies with the HER2 receptor (PDB ID: 3PP0) showed good binding affinity (-9.8 k cal mol⁻¹) with the aid of supporting hydrogen bonding and hydrophobic interactions with prominent amino acid residues, which reflected potential anticancer activity. Combined, the findings emphasize the exciting multifunctionality of **I**, whose potential uses range from materials science to being a lead scaffold in drug design, particularly for HER2-targeted anticancer drugs.

Keywords: “Quantum mechanical calculations, Hirshfeld surface analysis, molecular docking.”

1. Introduction

Triazene derivatives are characterized by a diazoamino (–N=N–N–) linking two aryl or alkyl groups [1]. Triazenes have this property in that they become isoelectronic with azobenzenes and produce reactive diazonium intermediates in situ, the foundation of their chemical and biological diversity. In fact, there are numerous triazene compounds and they have various applications: they are employed as chemical reagents and synthons in synthesis [1] and they exhibit a variety of bioactivity. For example, several triazenes have been investigated for antimicrobial, anti-inflammatory, antioxidant and anticancer activity [1]. Clinically, the alkylating chemotherapeutic agents dacarbazine and temozolomide are triazene derivatives that methylate DNA to yield antitumor activity [2]. New diaryltriazene analogues (e.g., 1,3-diaryltriazene compounds) have more recently been synthesized and reported to possess strong biological effects – e.g., Figueirêdo et al. (2021) reported new 1,3-diaryltriazene derivatives with promising antimicrobial and anticancer activities [1]. These findings demonstrate the pharmacological value of the triazene framework and impel investigation of similar compounds. A biologically highly relevant target in oncology is the human epidermal growth factor receptor 2 (HER2, also known as ErbB2). HER2 is a transmembrane receptor tyrosine kinase protein participating in cell survival and proliferation, the gene amplification or protein overexpression being responsible for oncogenic signaling in multiple tumors [3]. In breast cancer, 15-30% of tumors are HER2-positive, indicative of aggressive disease but rendering the patient eligible for HER2-targeted therapy [3,4]. Indeed, the generation of HER2 inhibitors (such as the monoclonal antibody trastuzumab and the kinase inhibitor lapatinib) has substantially transformed the outcome in HER2-positive malignancies [4]. As HER2-positive tumors remain an important clinical challenge, the discovery of new small-molecule HER2

¹ Corresponding Author
E-mail Address: ccersanli@sinop.edu.tr

antagonists continues to be a research focus. Here, **I** – a diaryltriazene – is of interest as a lead; its planarity and electron-rich diazoamino linkage could facilitate interaction with kinase domains, but its HER2-binding properties have not been investigated. To investigate such possibilities, we employ computational chemistry methods. Density functional theory (DFT) provides accurate quantum-mechanical data on the optimized geometry of a molecule, frontier orbital energies, charge distribution, and related electronic properties [5]. Ouma et al. (2024) note that DFT achieves a reasonable balance between accuracy and efficiency for the exploration of small drug-like molecule [5], for example, DFT is able to reliably estimate bond strengths, ionization potentials, and relative conformational energies that determine reactivity [5]. Concurrently, molecular docking simulations mimic how a ligand will bind into a protein's active site and determine its binding affinity. Docking is commonly utilized in structure-based drug discovery owing to its ability to screen candidates rapidly and anticipate critical interactions with a target [6]. As an example, Lamichhane et al. (2023) applied docking and molecular dynamics to discover phytochemical HER2 inhibitors [4], demonstrating the capability of *in silico* screening to rank emerging anticancer agents as high priority. In summary, the combination of DFT and docking allows one to define the intrinsic electronic structure of a compound and predict its ability to interact with a biologically relevant target, thus guiding subsequent experimental investigation. This strategy is validated by previous research on diaryltriazene compounds. As discussed previously, Figueirêdo et al. (2021) synthesized and characterized some 1,3-diaryltriazene derivatives and reported extensive antimicrobial and antitumor activities [1]. These experimental results suggest that diaryltriazenes can interact with a range of biological targets, but the molecular mechanism of action is not known. To our knowledge, no other study has examined **I** by quantum chemistry or protein-binding modeling. This study, we perform DFT calculation for this compound to yield its optimized structure and electronic descriptors (*e.g.*, HOMO–LUMO gap, electrostatic potential) and then proceed with docking simulation against HER2 kinase domain. This theoretical exploration is aimed toward insight into the reactivity profile of the compound and possible mode of binding with HER2 and providing hypothesis regarding its pharmaceutical application.

2. Materials and Method

All quantum chemical calculations in this study were performed with the assistance of the Gaussian 03 program package [7]. The molecular geometries were optimized by minimizing the overall energy with respect to all the geometrical parameters without applying any symmetry constraints. DFT calculations were performed using the B3LYP exchange-correlation functional [8,9] and the 6-311++G(d,p) basis set, implemented in a computational framework similar to that of the Gaussian 03 software. GaussView program [10] was used to visualize the optimized molecular structure. To estimate NLO properties, total molecular dipole moment (μ), mean polarizability (α), and first-order hyperpolarizability (β) were calculated at the same level of theory. Since the output values of α and β from Gaussian are atomic units (a.u.), they were converted to electrostatic units (e.s.u.) using the following conversion factors: α (1 a.u.) = 0.1482×10^{-24} e.s.u. and β (1 a.u.) = 8.6393×10^{-33} e.s.u.

The following equations were used to compute the overall values:

Total Molecular Dipole moment:

$$\mu_{\text{total}} = (\mu_x^2 + \mu_y^2 + \mu_z^2)^{1/2} \quad (1)$$

Average polarizability:

$$\alpha = \frac{1}{3}(\alpha_{xx} + \alpha_{yy} + \alpha_{zz}) \quad (2)$$

$$\beta_{\text{total}} = (\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2)^{1/2} \quad (3)$$

Total first-order hyperpolarizability:

Where

$$\begin{aligned} \beta_x &= \beta_{xxx} + \beta_{xyy} + \beta_{xzz} \\ \beta_y &= \beta_{yyy} + \beta_{xxy} + \beta_{yyz} \\ \beta_z &= \beta_{zzz} + \beta_{xxz} + \beta_{yyz} \end{aligned} \quad (4)$$

HOMO-LUMO energy levels were calculated in order to analyze the electronic structure and reactivity of the compound. The MEP surface was calculated by the B3LYP/6-311++G(d,p) method in order to identify the possible reactive zones and intra- and intermolecular interactions. The electron acceptor is LUMO, whose energy equals the electron affinity ($EA = -E_{\text{LUMO}}$), while the

electron donor is HOMO, and the ionization potential is $IP = -E_{HOMO}$. Based on these, Parr et al. (1999) proposed the global electrophilicity index (w), a measure of the electron-accepting capacity of a molecule and calculated by [11]:

$$w = \frac{\mu^2}{2\eta} \quad (5)$$

Here, η is the overall hardness and μ the chemical potential, defined as:

$$\eta = \frac{E_{LUMO} - E_{HOMO}}{2} = \frac{IP - EA}{2} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{E_{LUMO} + E_{HOMO}}{2} = \frac{-(EA + IP)}{2} \quad (7)$$

Other global reactivity descriptors were calculated, including:

Global softness:

$$S = \frac{1}{2\eta} \quad (8)$$

Absolute electronegativity:

$$\chi = -\mu = \frac{IP - EA}{2} \quad (9)$$

Maximum number of electrons that a system can hold:

$$\Delta N_{max} = \frac{(IP + EA)}{2(IP - EA)} = -\frac{\mu}{2\eta} \quad (10)$$

All the descriptors were computed at the B3LYP/6-311++G(d,p) level of theory. The computations were performed in the gas-phase and in six solvents [benzene, dichloromethane, ethanol, methanol, dimethyl sulfoxide (DMSO), and Water] using the Polarizable Continuum Model (PCM) [12]. Thermodynamic properties such as heat capacity, entropy, and enthalpy were computed at temperatures ranging from 100 K to 1000 K. Additional analyses like Mulliken atomic charges, and NPA were performed with the same DFT method. Hirshfeld surface [13,14], and 2D fingerprint [15] plots were obtained using CrystalExplorer Version 17.5 software from the input crystallographic information file (CIF) [13]. Hirshfeld surface analysis [15,16] was performed to study the visualization of intermolecular interactions and identify the hydrophilic nature of the compound. Normalized contact distance (d_{norm}) is definable and estimable by using the equation:

$$d_{norm} = \frac{d_i - r_i^{vdw}}{r_i^{vdw}} + \frac{d_e - r_e^{vdw}}{r_e^{vdw}} \quad (11)$$

In the above equation, d_e and d_i are the distance from the nearest atom outside and inside of the surface, respectively, and both of these distances are utilized to define the normalized contact distance (d_{norm}). The values of d_{norm} are illustrated on the Hirshfeld surface by a red-blue-white (RBW) color scheme. Finally, molecular docking experiments were performed to investigate the interaction between the target compound and the HER2 mutant protein receptor (PDB ID: 3PP0) [17]. Docking simulations were performed using AutoDock 1.5.6 [18], and the data were visualized using Biovia Discovery Studio [19].

3. Results and discussion

3.1. Optimized Geometry

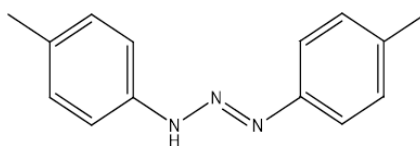


Fig. 1. Chemical diagram of I.

Since the single-crystal X-ray structure of compound **I** was previously reported [20], the present study used those crystallographic data without redetermination. The molecular structure, shown in Fig. 1, was obtained through the experimental techniques described in the cited work. Monoclinic, space group $P2_1/n$ crystallographic data of compound **I** have been found with cell dimensions $a = 14.4024$ (19), $b = 4.8171$ (4), $c = 17.840$ (2) Å and $V = 1237.3$ (3) Å³. Fig. 2(a) gives an ORTEP-III view of the molecular structure of compound **I**. Optimized parameters (bond angles, bond lengths, and dihedral angles) of the title compound were derived [see Fig. 2(b)]. The overlap of the X-ray crystal structure (red) and the density functional theory (DFT)-optimized geometry (blue) of **I**, with a root-mean-square deviation (RMSD) of only 0.106 Å, indicates a very high level of agreement between theoretical and experimental molecular structures [see Fig. 2(c)]. This very low RMSD indicates that the DFT technique correctly captures the structural features displayed in the solid state, thereby supporting the validity of the employed computational model [9,22]. The very good superimposition throughout the entire molecule implies a modest level of conformational flexibility, likely caused by the rigidity imposed by the aromatic and triazene units, which strengthens the molecule's stability further in isolated and crystalline media. This strong convergence validates the efficiency of DFT, particularly hybrid functionals like B3LYP, in accurately describing the geometry of equivalent aromatic triazenes [22].

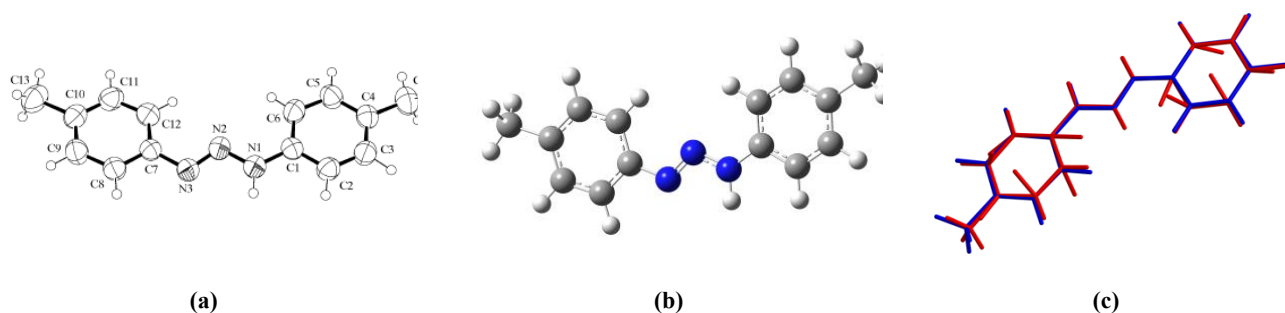


Fig. 2. (a) Reproduced experimental molecular structure of the title compound taken from ref [20], 2005. Displacement ellipsoids are represented at the 50% probability level. (b) Theoretically optimized geometric structure of the title compound. (c) Overlap of the X-ray structure (red) of the title compound and its DFT optimized counterpart (blue) (RMSD 0.106).

The experimental and calculated bond distances and bond angles are compared in Table 1. The gas-phase comparison between experimental (X-ray) and theoretical (DFT-B3LYP/6-311++G(d,p) set) bond lengths and angles reveals some interesting aspects. The theoretical bond lengths are very similar to the experimental ones, with small differences typically ranging from 0.0003 Å to 0.02 Å, which shows that the gas-phase DFT model accurately represents the molecular structure [9]. For example, the N1-N2 bond length is practically identical for both theoretical and experimental measures (1.332 Å and 1.3317 Å), with good agreement between the two methods. However, there are minor differences in certain bonds, i.e., the N2-N3 bond, where the theoretical [1.2580 Å] is shorter than the experimental [1.278(2) Å] value. This difference could be a result of the idealized nature of the gas-phase model, which doesn't include intermolecular forces and solvent effects that can influence the bond length in a real system. Similarly, the calculated bond angles also show good agreement with experimental data, the deviations being largely within 1°, as usual in gas-phase DFT calculations [21]. For instance, the N2-N1-C1 bond angle is 120.35(17)° experimentally and 120.922° calculated, differing by a mere 0.57°, reflecting minor overestimation of the angle in the gas-phase. The gas-phase model would also anticipate bond angles to be somewhat larger in some cases, such as the N1-N2-N3 angle [112.07(15)° experimental vs. 112.776° theoretical], owing to the lack of steric interactions or packing effects that occur in a condensed phase [23]. Overall, gas-phase DFT calculations exhibit excellent agreement with experimental values for both bond angles and bond lengths, with small deviations expected from the neglect of environmental contributions in the computational model. These results suggest the DFT-B3LYP/6311++G(d,p) method as a reliable method for the prediction of molecular geometries, even in the isolated gas-phase, and small discrepancies as the consequence of intrinsic limitations in the method.

Table 1. Ground state geometries of title compound: experimental and optimized. Bond lengths (Å) and angles (°) with e.s.d.s in parentheses.

Bond Distances, Bond and Torsion Angles	Experimental [20]	Theoretical
N1-N2	1.332(2)	1.3317
N1-C1	1.393(2)	1.3986
N2-N3	1.278(2)	1.2580
N3-C7	1.430(2)	1.4336
C1-C2	1.375(2)	1.3819
C1-C6	1.390(2)	1.3998
C4-C14	1.507(2)	1.5095
C7-C8	1.366(2)	1.3774
C7-C12	1.381(2)	1.3848
C10-C13	1.516(2)	1.5089
N2-N1-C1	120.35(17)	120.922

Table 1. Ground state geometries of title compound: experimental and optimized. Bond lengths (Å) and angles (°) with e.s.d.s in parentheses. (Continued)

Bond Distances, Bond and Torsion Angles	Experimental [20]	Theoretical
N1-N2-N3	112.07(15)	112.776
N2-N3-C7	112.65(14)	113.295
N1-C1-C2	118.56(17)	118.501
N1-C1-C6	122.71(18)	122.302
N3-C7-C8	115.97(17)	115.823
N3-C7-C12	125.41(18)	125.285
C8-C7-C12	118.61(19)	118.892
C9-C10-C13	120.49(19)	121.534
C11-C10-C13	121.8(2)	120.654
C1-N1-N2-N3	177.21(15)	179.888
N1-N2-N3-C7	177.97(14)	179.963
N1-C1-C2-C3	177.64(18)	177.874
N3-C7-C8-C9	179.17(17)	179.990
N3-C7-C12-C11	-179.82(18)	-179.984

3.2. NLO Properties

The NLO nature of **I**, predicted at the DFT-B3LYP/6-311++G(d,p) theoretical level, demonstrates that the compound has high prospects for photonic and optoelectronic technology (Table 2). The total dipole moment (μ_{total}) is predicted to be 0.8640 D, representing moderate polarity, which could be beneficial to favor intramolecular charge transfer (ICT) a key factor for second-order NLO materials [21]. The mean polarizability (α) is 29.29036 Å³ from the principal components $\alpha_{xx} = 403.9525$ a.u., $\alpha_{yy} = 188.9018$ a.u., and $\alpha_{zz} = 105.8427$ a.u., which means that the molecule should be highly polarizable, particularly along the x-axis. Most importantly, the first hyperpolarizability (β_{total}) is calculated to be 9.4976×10^{-30} e.s.u., approximately 7.29 times the reference value of urea (1.30×10^{-30} e.s.u. at the same theory level) [24]. The enhancement reflects strong second-order NLO activity, with the enormous β_{xxx} contribution (1158.3794 a.u.) being primarily responsible for dominating the molecular response along the x-axis. The large β units reflect efficient ICT across the conjugated structure due to the electron-donating methyl groups and electron-accepting triazene ring. These features make the compound of special interest for materials applications in areas like frequency doubling, electro-optic modulation, and optical switching.

Table 2. Calculated dipole moments (μ), polarizability (α) and first hyperpolarizability (β) components for **I.**

μ_x	-0.3257 a.u.	β_{xxx}	1158.3794 a.u.
μ_y	0.0968 a.u.	β_{xxy}	-9.3958 a.u.
μ_z	0.0119 a.u.	β_{xyy}	-53.1846 a.u.
μ_{total}	0.8640 D	β_{yyy}	-116.4266 a.u.
α_{xx}	403.9525 a.u.	β_{xxz}	18.8178 a.u.
α_{xy}	0.8290 a.u.	β_{xyz}	-11.4859 a.u.
α_{yy}	188.9018 a.u.	β_{yyz}	5.4292 a.u.
α_{xz}	-0.6433 a.u.	β_{xzz}	-11.3057 a.u.
α_{yz}	0.1339 a.u.	β_{yzz}	16.7442 a.u.
α_{zz}	105.8427 a.u.	β_{zzz}	7.9086 a.u.
α	29.29036 Å ³	β_{total}	9.4976×10^{-30} e.s.u.

3.3. HOMO, LUMO and MEP

The spatial distributions of **I**'s highest occupied molecular orbital (HOMO) and lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) were calculated using DFT with the B3LYP functional and 6-311++G(d,p) basis set [8]. As indicated from Fig. 3(a), HOMO tends to be generally delocalized across the triazene moiety (–N=N–NH–) and into the conjugated π -skeleton of the phenyl rings adjacent, particularly the para positions of methyl-substituted phenyl groups. Delocalization of such electron density in the HOMO means very strong π -conjugation and thus raises the electron-donating nature of the molecule. This localization indicates that these regions are very likely to be involved in oxidation reactions or electrophilic interactions [11]. In contrast, the LUMO is highly localized on one phenyl ring and has minimal overlap with the triazene functionality. The electron-deficient character of the LUMO indicates that the region of the molecule is more reactive to nucleophilic attack and can act as an electron acceptor. The spatial distancing of HOMO and LUMO zones from what is observed indicates successful charge transfer when excited, a desirable property in optoelectronic materials and NLO devices. Secondly, the fairly good energy gap between the HOMO and LUMO is indicative of balance in between molecular stability and chemical reactivity, which is vital in molecule design with controllable electronic properties [11, 25].

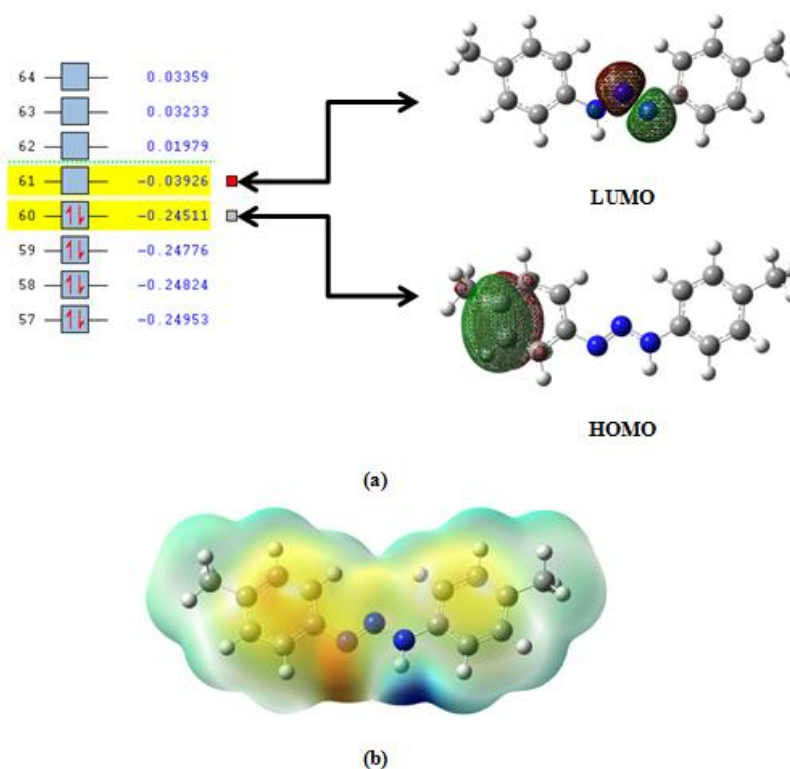


Fig. 3. The HOMO and LUMO distributions (a) and MEP map (b) of **I**.

The molecular electrostatic potential (MEP) surface, which is plotted in the energy range of -0.03998 to +0.03998 atomic units (a.u.), gives a three-dimensional representation of the electrostatic charge distribution on the molecular surface [Fig. 3(b)]. It is employed to predict electrophilic and nucleophilic attack sites based on local electron density. For **I**, the most negative possible region (-0.02827 a.u.) is the area around the nitrogen atom N3 of the triazene group. This very electronegative region suggests high electrophilic attack susceptibility by localized lone pairs and resonance stabilization. The most positive region of the electrostatic potential appears in the area around the hydrogen atom H1N with an approximate value of +0.03935 a.u. This position is analogous to the hydrogen on the terminal -NH- group of the triazene unit. Its high positive potential suggests its propensity for nucleophilic interaction, which can involve the formation of hydrogen bonds in intermolecular or biological environments. The electrostatic potential smooth gradient across the aromatic rings and triazene bridge is characteristic of a polar molecular surface, which plays a significant role in determining the compound's interaction with polar solvents and biological macromolecules [26]. This congruence of MEP values indicates that the molecule possesses well-defined regions of electrophilic and nucleophilic character, which not only overlap with frontier orbital distribution but also contribute to the transparency of the molecule's character in chemical and biological systems. This is particularly important for applications such as drug design and molecular docking, where local charge differences influence binding affinity and specificity [27].

3.4. Global Reactivity Descriptors

Frontier molecular orbital energies and global reactivity parameters of **I** were computed in the gas-phase and in six solvents, *viz.* benzene, dichloromethane, ethanol, methanol, DMSO, and water, at the B3LYP/6-311++G(d,p) level using the PCM. The compound has a comparatively large HOMO–LUMO energy gap ($\Delta E = 5.6015$ eV) in the gas-phase, *i.e.*, high kinetic stability and low inherent chemical reactivity [21]. The HOMO energy (-6.67 eV) is an index of the ionization potential (*IP*) of the molecule, and the LUMO energy (-1.07 eV) is an index of the electron affinity (*EA*). From them, the global hardness ($\eta = 2.80$ eV), the softness ($S = 0.17853$ eV⁻¹), and a moderate dipole moment ($\mu = 0.8640$ D) are calculated, suitable for a relatively nonpolar electronic distribution in the gas-phase. Among solvent phases, a trend of increasingly higher chemical softness and polarity is observed with an increase in the dielectric constant (ϵ). Moving from benzene ($\epsilon = 2.3$) to water ($\epsilon = 78.35$), HOMO energy rises from -5.64 eV to -5.74 eV, while LUMO decreases from -1.90 eV to -2.03 eV. This stabilization of frontier orbitals, and especially the LUMO, promotes the molecule's ability to accept electrons (increased *EA*) and is a sign of increased tendency for electrophilic interactions [11]. ΔE consequently drops significantly from 5.60 eV (gas) to ~3.71 eV in polar solvents of high polarity, implying an increase in chemical reactivity and decreased kinetic stability [28]. Global hardness (η) also exhibits a parallel trend, decreasing from 2.80 eV in vacuum to 1.85 eV in water. As a reciprocal function, the softness (*S*) increases to 0.26959 eV⁻¹, corroborating the fact that the compound is softer and more reactive in polar solvents chemically. Soft molecules will more readily undergo charge transfer and are therefore useful for electron transport, coordination chemistry, or bio-binding applications [29]. The dipole moment (μ), a measure of the net polarity, also rises consistently across the solvent continuum,

from 0.8640 D in the gas-phase to 1.2416 D in water. This would signify strong polarization of the molecule by the solvent, which may increase its potential solubility, hydrogen bonding, and electrostatic interactions in aqueous or biological media [30].

Table 3. Calculated energies, frontier orbital energies, chemical hardness and dipole moments of structure for six different solvents.

DFT/B3LYP/6-311++G(d,p)							
	Gas-phase	Benzene	Dichloromethane	Ethanol	Methanol	DMSO	Water
	($\epsilon = 1$)	($\epsilon = 2.3$)	($\epsilon = 8.93$)	($\epsilon = 24.55$)	($\epsilon = 32.61$)	($\epsilon = 46.7$)	($\epsilon = 78.35$)
E_{total} (Hartree)	-706.9257	-706.9289	-706.9321	-706.9331	-706.9332	-706.9334	-706.9335
E_{HOMO} (eV)	-6.6698	-5.6439	-5.7090	-5.7302	-5.7334	-5.7364	-5.7394
E_{LUMO} (eV)	-1.0683	-1.8983	-1.9894	-2.0180	-2.0221	-2.0262	-2.0300
ΔE (eV)	5.6015	3.7456	3.7195	3.7122	3.7113	3.7103	3.7095
EA (eV)	1.0683	1.8983	1.9894	2.018	2.0221	2.0262	2.0300
IA (eV)	6.6698	5.6439	5.7090	5.7302	5.7334	5.7364	5.7394
η (eV)	2.8007	1.8728	1.8598	1.8561	1.8557	1.8551	1.8547
S (eV) ⁻¹	0.17853	0.26698	0.2688	0.26938	0.26944	0.26953	0.26959
μ (D)	0.8640	1.0354	1.1846	1.2250	1.2307	1.2363	1.2416

By comparing trends across the solvents, dichloromethane ($\epsilon = 8.93$), although moderately polar, already leads to a significant decrease in ΔE (3.72 eV) compared to benzene (3.75 eV), showing that even intermediate dielectric constant solvents can cause major effects on molecular orbital energies. From ethanol ($\epsilon = 24.55$) to water ($\epsilon = 78.35$), the trend weakens, suggesting that the stabilization effect asymptotically saturates in high-dielectric media. Notably, the IP steadily decreases from 6.67 eV in the gas-phase to 5.74 eV in water, suggesting a reduced energy requirement for electron removal in solvated media. On the contrary, EA increases from 1.07 eV to 2.03 eV through the same phase transition and raises the capacity of the molecule for electron density acceptability. All these transformations together result in less chemical hardness and higher softness and therefore augment the reactivity and electrophilicity of the molecule in polar solvents. These findings are of great significance in understanding solvent-dependence in reactivity, especially for drug delivery, molecular docking, or catalytic systems where the molecule would behave differently under solvated conditions versus vacuum. A case in point is the way that the higher dipole moment and electron affinity in aqueous conditions imply the molecule might form more robust electrostatic interactions or hydrogen bonding with polar surfaces or biomolecules. Thus, environmental context is critical in the prediction of I 's behavior in chemical and biological systems.

3.5. Mulliken Population Analysis and Natural Population Analysis (NPA)

Fig. 4 and Table 4 show an extensive comparison of Mulliken and natural population analysis (NPA) atomic charges of the 1,3-bis(4-methylphenyl)triazene molecule computed at the B3LYP/6-311++G(d,p) level of theory and present significant discrepancies in the representation of electron density distribution of each method.

Table 4. Mulliken population method and natural population analysis computed net charges.

Atom	Mulliken Charge (e)	Natural Charge (e)	Atom	Mulliken Charge (e)	Natural Charge (e)
N1	-0.272712	-0.36401	C14	-0.454350	-0.58663
N2	0.335148	-0.01933	H1N	0.296565	0.36940
N3	-0.053903	-0.28937	H2	0.124905	0.20021
C1	-0.175407	0.14266	H3	0.153858	0.20049
C2	-0.279626	-0.22865	H5	0.189110	0.20408
C3	-0.523758	-0.18639	H6	0.152859	0.22505
C4	0.609253	-0.05291	H8	0.174485	0.21128
C5	-0.405058	-0.17695	H9	0.129688	0.19934
C6	0.058272	-0.22210	H11	0.198333	0.20217
C7	-0.448971	0.09474	H12	0.129791	0.21904
C8	-0.159797	-0.18333	H13A	0.152988	0.21043
C9	-0.654359	-0.20446	H13B	0.150309	0.20358
C10	0.621482	-0.02816	H13C	0.161224	0.21464
C11	-0.233903	-0.19161	H14A	0.138482	0.20342
C12	0.087519	-0.19921	H14B	0.142743	0.20810
C13	-0.515885	-0.58932	H14C	0.170717	0.21386

Both techniques assign small, positive partial charges to hydrogen atoms -with Mulliken charges from about +0.12 e to +0.30 e and NPA values from +0.20 e to +0.37 e- demonstrating consistency for these less electronically advanced atoms. But wide divergences arise in charging heavier atoms, which indicate methodological limitations built into Mulliken population analysis. For instance, Mulliken saddles the inner nitrogen atom N2 with an enormous positive charge of +0.335 e, whereas NPA places this atom at nearly neutral or very slightly negative (-0.019 e), which is a glaring overestimation by Mulliken due to its extreme basis set dependence and overlap of atomic orbitals. Correspondingly, Mulliken reports highly positive charges on C4 and C10 carbon atoms (around +0.609 e and +0.621 e, respectively) compared to NPA results, which report the atoms as strongly near neutral or slightly negative atoms (-0.053 e and -0.028 e, respectively), and which shows that Mulliken doesn't capture effects of electron delocalization and polarization effectively. Additional discrepancies for atoms C3 and C7 are observed such that Mulliken charges are not only of the opposite sign from the corresponding values of NPA but also varying in magnitude. Additionally, the carbon atoms from the methyl-substituted phenyl rings at positions C13 and C14 exhibit unusually significant negative charges during the NPA analysis (*ca.* -0.59 e), contrasting with less negative values in Mulliken, as highlighting NPA's enhanced management of π -electron density and conjugation. These discrepancies indicate that Mulliken population analysis, beneficial as it may be for fast and rough evaluation, tends to produce chemically unreasonable or excessively high charge distributions, especially in systems with delocalized electrons or polar bonds. In contrast, NPA gives more chemically useful and physically reasonable atomic charge descriptions because of its lesser sensitivity to the choice of basis set and due to the utilization of natural localized molecular orbitals. The overall trend is that NPA produces lower-magnitude values for charge and greater consistency with established electronegativity trends-assigning negative charges to more electronegative atoms (*e.g.*, nitrogen and some carbon atoms) and positive charges to less electronegative atoms (*e.g.*, hydrogen). Hence, for a molecule like **I**, where correct interpretation of electron distribution is the key to defining reactivity and intermolecular interactions, NPA would be the preferred method, and Mulliken analysis would be employed judiciously and only for comparative purposes or convention's sake.

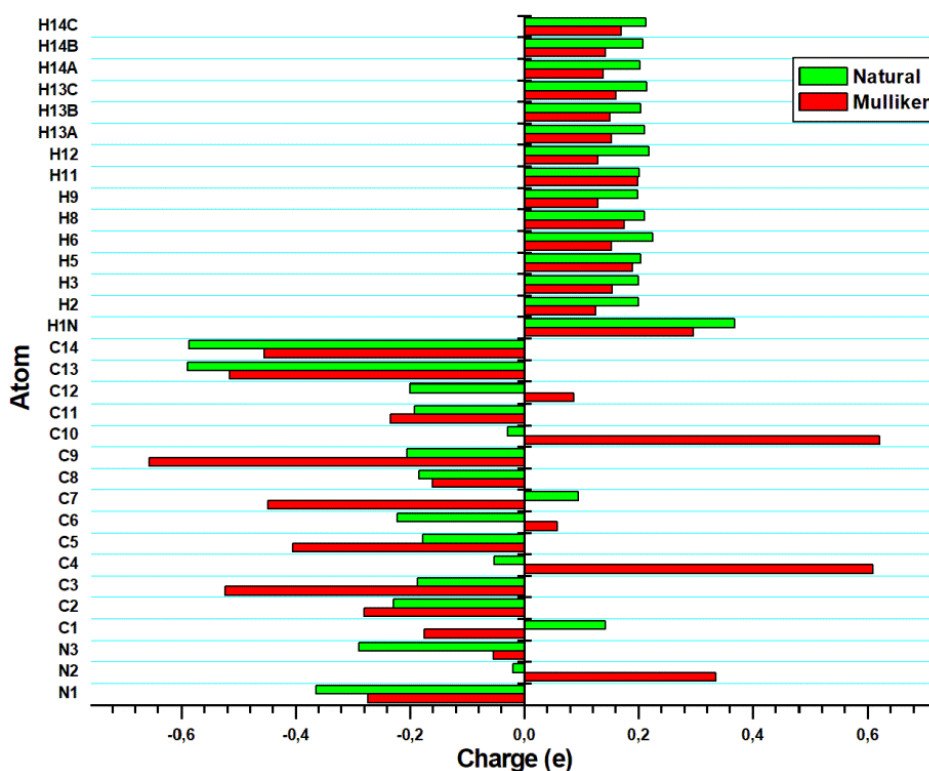


Fig. 4. Mulliken and natural charge values for the atoms of the compound graph.

3.6. Thermodynamic Properties

The thermodynamic properties as a function of temperature - constant pressure heat capacity ($C_{p,m}^0$), entropy (S_m^0), and enthalpy change (H_m^0) - for **I** were computed at the B3LYP/6-311++G(d,p) level in gas-phase from 100 to 1000 K (Table 6, Fig. 5).

These parameters provide valuable information on the thermal behavior, stability, and energy storage capacity of the molecule across a wide range of thermal conditions. The heat capacity calculated exhibits a strong, close to linear dependence on temperature with rising temperature, from 25.392 cal mol⁻¹ K⁻¹ at 100 K to 139.094 cal mol⁻¹ K⁻¹ at 1000 K. This is typical for molecular systems and is a result of the stepwise excitation of vibrational, rotational, and translational degrees of freedom with increasing thermal energy [31]. Heat capacity is dominated at low temperatures by translational and rotational modes, but at temperatures well above ~400 K, significant vibrational contributions are dominant. This monotonic increase attests to the fact

that more heat is being consumed by the molecule for each degree temperature change when it's warmer, a property useful in defining thermal buffering and stability in chemical and physical processes. The values of entropy, describing the magnitude of molecular randomness, also register a consistent increase from 91.797 cal mol⁻¹ K⁻¹ for 100 K to 259.711 cal mol⁻¹ K⁻¹ for 1000 K. The rate of rise decelerates a bit at high temperatures, showing logarithmic-like behavior characteristic of statistical thermodynamics [32]. This rise in entropy can be attributed to the increased set of available molecular microstates due to more populated vibrational and rotational motions. At 298.15 K (room temperature), the calculated entropy is 135.861 cal mol⁻¹ K⁻¹, well within the range one would anticipate for medium-sized organic molecules, again supporting the thermodynamic viability of the system. The enthalpy change at absolute zero, H⁰_m, increases significantly from 1.9463 kcal mol⁻¹ at 100 K to 87.7520 kcal mol⁻¹ at 1000 K. This growth is nearly quadratic with temperature, as it must be in the integral relationship between heat capacity and temperature [33]. H⁰_m is 10.4754 kcal mol⁻¹ under standard conditions (298.15 K), indicating that the molecule holds moderate internal energy on thermal excitation. Such behavior is an indication of growing energy content in the system and is of significance in approximating reaction enthalpies and thermal stability. In conclusion, all three thermodynamic properties - C⁰_{p,m}, S⁰_m, and H⁰_m - demonstrate smooth and physically consistent trends with temperature, validating the accuracy of the same method to model the gas-phase thermodynamic behavior of organic compounds. These findings are especially valuable for predicting reaction energetics, material design with temperature sensitivity, or further computational modeling in thermochemistry and kinetics [34].

Table 6. Temperature dependence of C⁰_{p,m}, S⁰_m and H⁰_m calculated at B3LYP/6-311++G(d,p) basis set for the molecule in gas-phase.

Temperature (K)	E (k cal mol ⁻¹)	C ⁰ _{p,m} (cal mol ⁻¹ K ⁻¹)	S ⁰ _m (cal mol ⁻¹ K ⁻¹)	H ⁰ _m (k cal mol ⁻¹)
100	165.336	25.392	91.797	1.9463
200	168.674	41.790	115.663	5.4830
298.15	173.477	59.355	135.861	10.4754
400	180.712	78.338	157.295	17.9190
500	189.351	93.948	176.950	26.7562
600	199.408	106.756	195.613	37.0122
700	210.623	117.202	213.187	48.4260
800	222.787	125.817	229.682	60.7892
900	235.739	133.015	245.163	73.9399
1000	249.353	139.094	259.711	87.7520

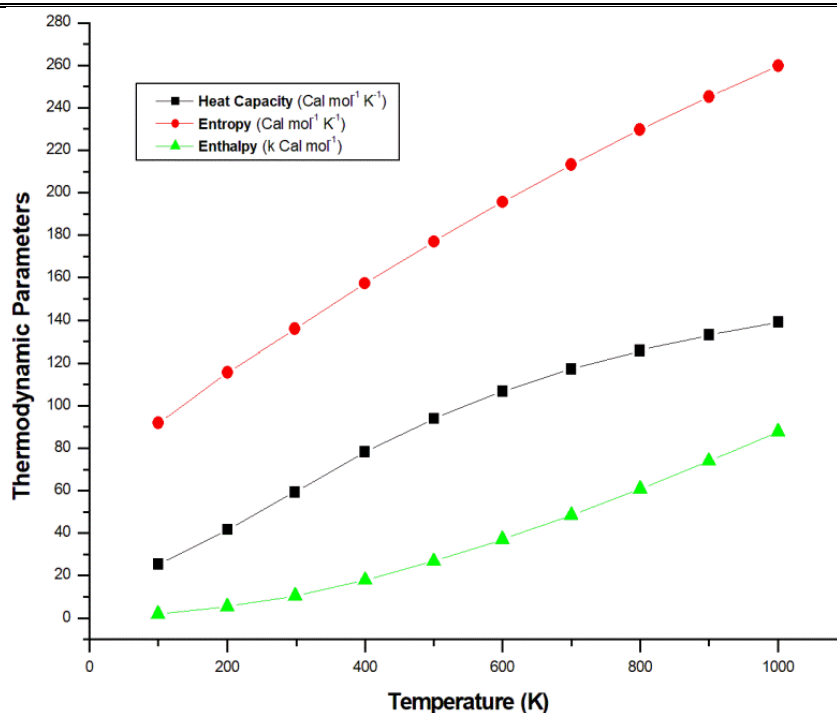


Fig. 5. Plot of calculated thermodynamic parameters vs. temperature of I in gas-phase.

To determine the temperature dependence of the thermodynamic properties of I, the computed values of the C⁰_{p,m}, S⁰_m, and H⁰_m in the gas-phase were used to fit second-order polynomial equations of the form $y = a + bT + cT^2$, where T is the temperature expressed in Kelvin. These correlations were derived from data computed from DFT calculations at the B3LYP/6-311++G(d,p) level and exhibit excellent agreement, as indicated by the high correlation coefficients (R^2). The heat capacity equation $C_{p,m}^0 = 1.49215 + 0.22799T - 9.03411 \times 10^{-5}T^2$ ($R^2 = 0.99903$) demonstrates a very strong, nearly linear rise in C⁰_{p,m} over the temperature range being studied. The positive linear term is the increasing ability of the molecule to accumulate energy with temperature, and the small negative quadratic term introduces a weak curvature, exhibiting a smooth saturation of accessible

vibrational modes at high temperatures. This is as classical and quantum statistical mechanics would predict for polyatomic molecules [31]. The entropy equation $S_m^0 = 68.3448 + 0.2432 T - 5.18755 \times 10^{-5} T^2$ ($R^2 = 0.99997$) reflects a quasi-linear rise in disorder with temperature, with minimal curvature. This is a result of the continuous thermal activation of translational, rotational, and vibrational degrees of freedom, leading to an increased number of accessible microstates. The extremely high R^2 value signals the model's strength and confirms the thermodynamic integrity of the DFT-calculated entropy values across a wide range of temperatures [32]. The enthalpy change $H_m^0 = -2.12054 + 0.02577 T + 6.49632 \times 10^{-5} T^2$ ($R^2 = 0.99952$) has a strictly increasing increase in H_m^0 with temperature, comprised of a dominant linear component and a minor accelerating quadratic component. The negative constant term is a numerical artifact of absolute zero extrapolation, with enthalpy being defined relative to the standard state. The positive coefficients for T and T^2 terms are physically meaningful, representing the accumulation of internal energy with more input of thermal energy [33]. Collectively, the good agreement between calculated data and fitted equations validate the reliability of the B3LYP/6-311++G(d,p) theory level in calculating gas-phase thermodynamics of medium-sized organic molecules. Such equations are reliable tools for predicting items based on interpolation of thermodynamic values over a continuum of temperatures and are worth employing for thermal process modeling, reaction kinetics, and materials design purposes.

3.7. Hirshfeld Surface Analysis

The d_{norm} -mapped Hirshfeld surface analysis of **I** is helpful in gaining insight into the intermolecular interactions that dictate its crystal packing. As evident from Fig. 6, close contacts are represented by deep red spots on the surface, with strong hydrogen-bonding interactions involving the nitrogen atom N3 being highlighted in particular. Two important interactions are observed: $N1-H1 \cdots N3$ and $C2-H2 \cdots N3$, both of which exhibit red spots that represent contact distances below the sum of van der Waals radii, testifying to their involvement in stabilizing the molecular assembly. Weakened interaction, $C14-H14 \cdots C5$, is also observed and is most probably a $C-H \cdots \pi$ interaction, which is involved in the crystal structure but with lower strength, as represented by the smaller red dot. The overall red to white to blue color gradient on the Hirshfeld surface further delineates regions of strong interaction, neutral contact, and minimal interaction, respectively. All these observations point to the dominating role played by hydrogen bonding, particularly with N3, in the formation and stabilization of the compound's crystal lattice.

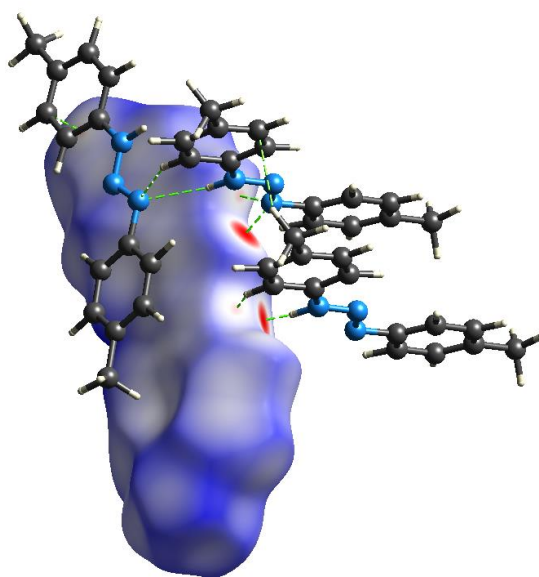


Fig. 6. The d_{norm} -mapped Hirshfeld surface for visualizing the intermolecular contacts for compound.

Fig. 7 is a precise visualization of the 3D Hirshfeld surfaces of the compound **I**, which gives a comprehensive report on its intermolecular interactions and crystal packing features. The d_{norm} -mapped surface (top left), ranging from -0.2673 to 1.4751, uses a red-white-blue color scheme to represent intermolecular contacts. Red regions, indicating negative d_{norm} values, are those contacts less than the van der Waals radii sum, e.g., $N1-H1 \cdots N3$ and $C2-H2 \cdots N3$ hydrogen bonds, bearing witness to their roles as directionality, strong interactions within the crystal lattice, also seen in Fig. 6. The d_i (inner distances) and d_e (outer distances) surfaces (upper right and center), varying from 0.9477 to 2.4926 Å and 0.9486 to 2.4218 Å, respectively, are the extent by which atoms within and outside the molecular surface are to neighboring atoms. Red and yellow areas in these maps indicate regions of tight atomic packing, while green to blue areas indicate regions of reduced interaction, indicating a heterogeneous contact environment surrounding the molecule. These mappings assist in evaluating the proximity of the molecule to its crystal neighbors from both internal and external perspectives. The shape index surface (bottom left), ranging from -1.0000 to +1.0000, is particularly well suited for the detection of π - π stacking interactions. These are indicated by the presence of alternating red (concave) and blue (convex) triangular patches on the surface of aromatic regions, suggestive of favorable overlap of π -electron systems between adjacent phenyl rings. The surface of curvedness (center bottom), from -4.0000 to 0.4000, is between flat

regions (green), typical of planar aromatic rings and potential stacking, and very curved regions (blue), associated with edges and non-planarity. These would be conducive to π - π interactions and uncover the molecular topography that is affecting crystal stability. The surface of the patch of the fragment (lower right), calculated within interval 0.0000 to 16.0000, marks chemically different regions of the molecule in various colors to give a clear indication of how different fragments of the molecule contribute to the overall interaction surface. Visualisation aids in the labelling of contact regions and topological positions of substituents and facilitates easier interpretation of structure-property relations within the lattice. Collectively, the quantitative data and visual representation of these Hirshfeld surface properties offer an extensive and well-coordinated image of the non-covalent interactions in **I**. The combination effect of intensive hydrogen bonding, π - π stacking, and van der Waals forces as described in these surface maps gives a cooperative yet complex network of interactions that controls the molecule's solid-state assembly, the crystal packing as a whole, stability, and structural coherence of the molecule.

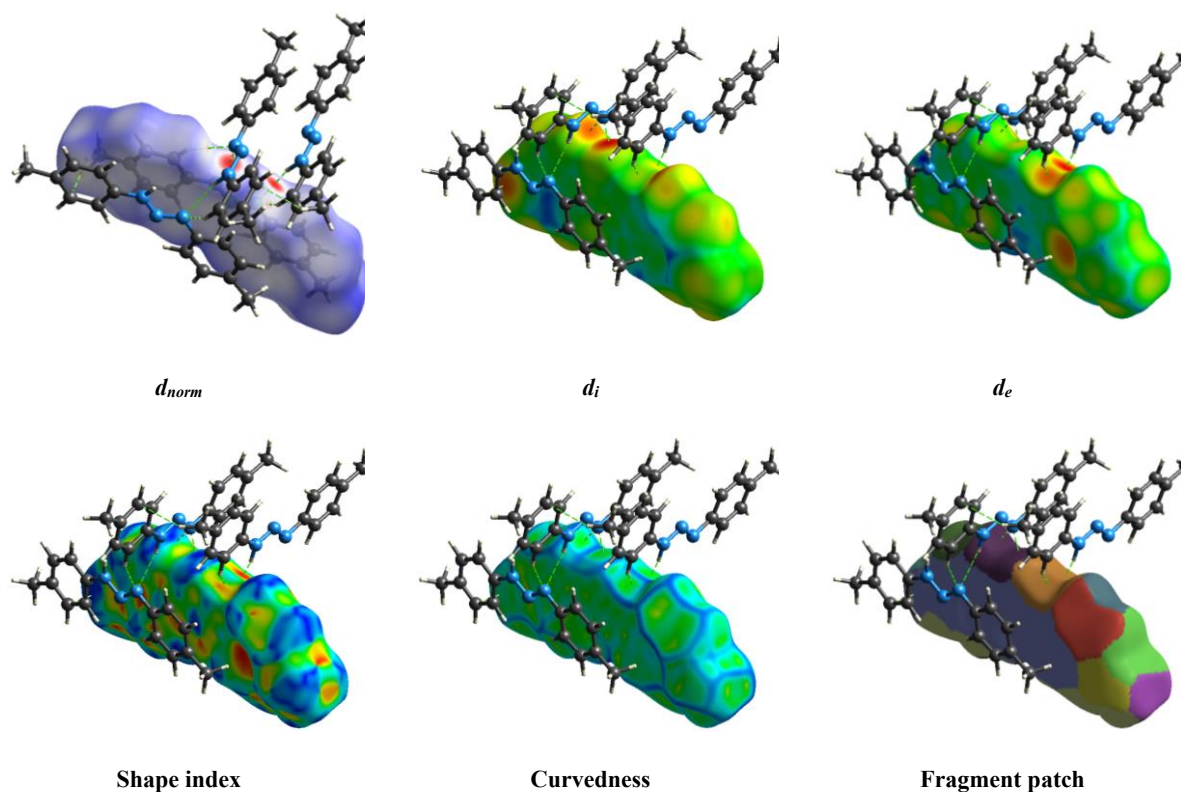


Fig. 7. View of the 3D Hirshfeld surfaces of **I**.

The Hirshfeld fingerprint of **I** shows that H $\cdots$ H contacts are the largest ($\approx 64.5\%$ of the surface) with C $\cdots$ H/H $\cdots$ C ($\sim 19.6\%$) and N $\cdots$ C/C $\cdots$ N ($\sim 8.0\%$) being the next largest fractions (Fig. 8). Such a profile indicates a lattice stabilized mainly by weak van der Waals forces: similar studies of all-hydrogen (hydrocarbon) crystals show that very high H $\cdots$ H fractions accompany close-packed, dispersion-bound networks [35]. Actually, though the many H $\cdots$ H contacts neatly fill space and optimize packing efficiency, they make little directional binding energy - in fact, such contacts typically have slightly positive (repulsive) electrostatic energy [36]. By contrast, the C $\cdots$ H/H $\cdots$ C contacts (approximately one fifth of the total) comprise numerous C-H $\cdots$ π and C-H $\cdots$ N interactions, which were determined to be electrostatically attractive and “drive and control” packing in aromatic systems [36]. These weak hydrogen-bond-like contacts are often the cause of typical motifs (such as herringbone layers or ribbons) and hence supply most of the cohesive energy in this crystal. The N $\cdots$ C/C $\cdots$ N contacts ($\approx 8\%$) likely result from alignment of neighboring aromatic carbons with the triazene nitrogen(s) (*e.g.*, lone-pair- π or dipolar interactions), adding further (if modest) orienting stabilization. In contrast, true π - π stacking (C $\cdots$ C contacts) virtually doesn't occur - C $\cdots$ C contacts are next to nothing in the fingerprint - as predicted by the assumption that straightforward C-C overlaps are disfavored when C-H attractions dominate [36]. Short N $\cdots$ H or N $\cdots$ N contacts are also very small, indicating no important N-H hydrogen bonds or pathological H-H bonding networks. Overall, the data project an image of a tightly interwoven, tidily packed organic lattice held together by isotropic dispersion and a web of weak C-H interactions. The implication is that crystal packing is highly dense, but since there are no strong directional bonds (like conventional H-bonds or π -stacks) in operation, thermal and mechanical stability will be only moderate: melting or slipping should be quite easy to induce even with high packing density. Finally, the largely van der Waals nature and planar diaryl-triazene framework suggest potential in organic and materials chemistry applications: *e.g.*, diaryltriazene derivatives were found to function as useful reagents or intermediates in organic synthesis and have been explored as pharmaceutical (anticancer, antimicrobial) or sensing molecules [1]. Overall, the fingerprinting calls attention to a crystal stabilized by strong dispersion and moderate C-H bonding, thus enabling effective packing without implying high intrinsic stability - a set of features that is in harmony with the familiar chemically versatile properties of diaryltriazene species [35].

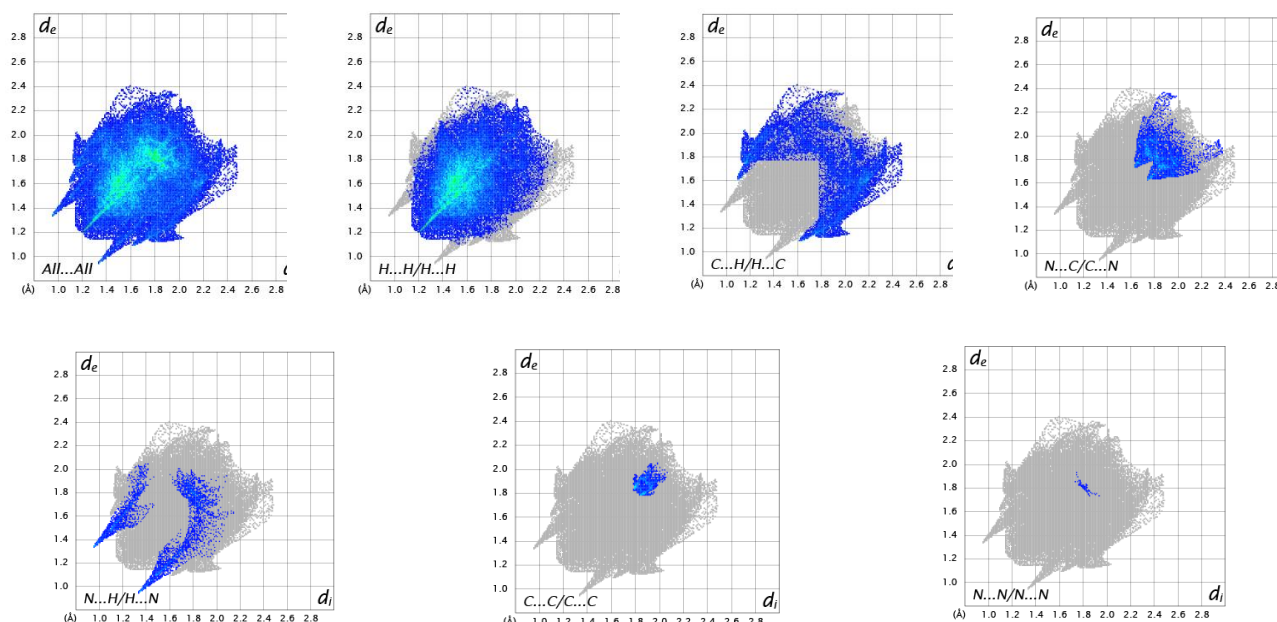


Fig. 8. All interactions of two-dimensional fingerprint plots for **I**.

3.8. Molecular Docking

Molecular docking simulations were carried out to examine the interaction profile of compound **I** with the human epidermal growth factor receptor 2 (HER2), a tyrosine kinase involved in mediating cell proliferation and survival signaling pathways. HER2 overexpression is known to be an instigating factor for tumorigenesis, particularly in breast and gastric cancer, and thus remains a high-priority target for anticancer therapy [17]. The docking result, computed using AutoDock Vina, was -9.8 k cal mol⁻¹ of binding energy, which is an indication of strong and thermodynamically favorable interaction comparable to the expected interaction for known HER2 inhibitors such as lapatinib and neratinib [18]. The docking experiment, as shown in Table 7 and Fig. 9, indicates that compound **I** fits well into the ATP-binding cleft of the HER2 kinase domain.

Table 7. Data from the binding simulation of the molecule against the HER2 receptor.

	Binding affinity (k cal mol ⁻¹)	Hydrophobic Interactions	Hydrogen Bond
Compound I	-9.8	Ala571	Asp803
		Lys753	Ser783
		Val734	

Hydrophobic contacts were observed between the molecule and important non-polar residues Ala571, Lys753, and Val734. The contacts are between the hydrophobic regions of the ligand and the participating amino acid side chains, primarily through van der Waals contacts and dispersion interactions. Even though Lys753 is usually a polar, basic residue, the microenvironment and alkyl side chain may both promote hydrophobic or π -cation contacts with the aryl rings of compound **I**, once more stabilizing the ligand-receptor complex [37]. In addition to such nonpolar interactions, two other important hydrogen bonds were discovered: one to Asp803, a critical catalytic residue, and the other to Ser783, which usually becomes engaged in kinase inhibitor stabilization. The hydrogen bonding to Asp803 likely stabilizes the ligand by strong electrostatic complementarity, while the binding to Ser783, as assisted by its hydroxyl group, might be linked with bifurcated hydrogen bonding to electronegative atoms on the phenyl or triazene groups. They are particularly important as they increase the binding specificity, decrease the overall binding energy, and contribute meaningfully to a more stable protein-ligand complex structure [38-41]. The triazene moiety, with its electron-rich and biologically active nature [42], is of interest in molecular recognition and electronic interactions, while the methyl-substituted aromatic rings enhance hydrophobic contact as well as lipophilicity, with a possible improvement of membrane permeability and bioavailability. Overall, these findings suggest that compound **I** is a good candidate as a lead scaffold for the construction of HER2-targeted anticancer agents. Its favourable binding energy, hydrophobic-polar interplay pair and structural components favorably lend to therapeutically active pharmacophores of kinase inhibitors and its triazene ring topology accommodates further improvement by way of functionalization or bioisosteres [43]. Although the docking results primarily focus on the studied compound, a comparison with the native ligand of the HER2 receptor (2-{2-[4-({5-chloro-6-[3-(trifluoromethyl)phenoxy]pyridin-3-yl}amino)-5H-pyrrolo[3,2-d]pyrimidin-5-yl]ethoxy} ethanol) and structurally related analogues would indeed provide further insight into its bioactivity potential. Due to limitations in available

structural data or scope, such a comparison was not performed in detail in the current study but is considered a valuable direction for future work.

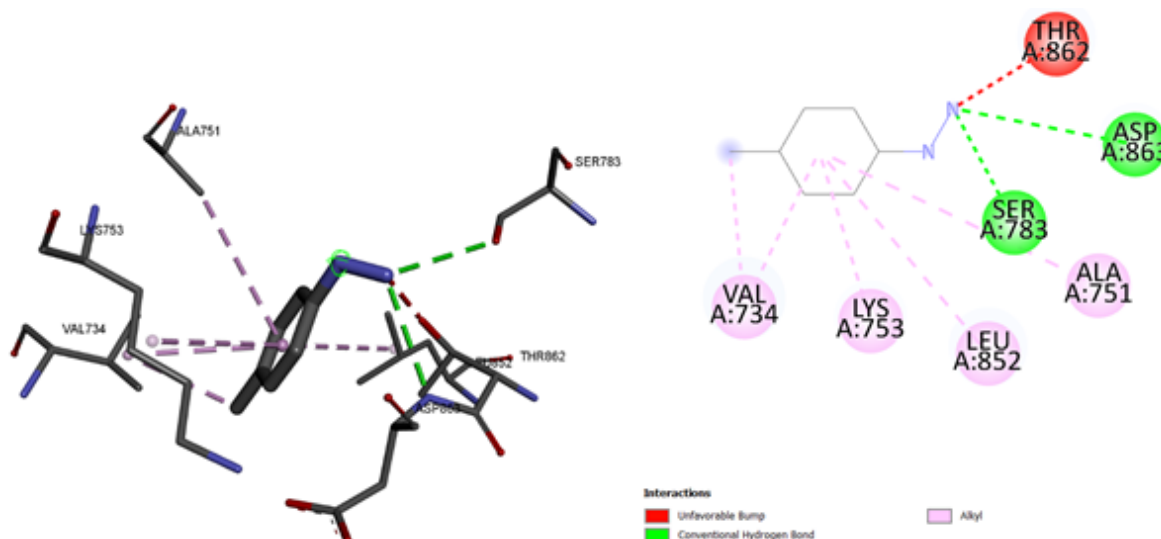


Fig. 9. Visualization of results of the HER2 receptor binding simulation with the molecule.

4. Conclusions

This study presents a comprehensive computational and structural analysis of 1,3-bis(4-methylphenyl)triazene, a diaryltriazene compound with promising pharmacological and material applications. Using density functional theory (DFT), molecular electrostatic potential (MEP), global reactivity descriptors, thermodynamic analysis, Hirshfeld surface mapping, and molecular docking, we investigated the molecule's structure, electronic properties, and biological potential. Geometry optimization at the B3LYP/6-311++G(d,p) level showed excellent agreement with crystallographic data (RMSD = 0.106 Å), confirming the reliability of DFT for modeling rigid, π -conjugated systems. The compound exhibited strong nonlinear optical (NLO) properties, with a first-order hyperpolarizability (β_{total}) nearly seven times that of urea, indicating its potential for applications in photonics and electro-optics. Frontier molecular orbital (FMO) analysis revealed a moderate HOMO–LUMO gap ($\Delta E = 5.60$ eV), suggesting a balance between reactivity and stability. In polar solvents, this gap decreased significantly (to ~ 3.71 eV in water), reflecting enhanced reactivity. Global reactivity descriptors further indicated increased electrophilicity and polarizability in such media. MEP and charge distribution analyses identified reactive sites around hydrogen and triazene nitrogen atoms, consistent with hydrogen bonding and electrostatic interactions. Thermodynamic parameters (entropy, enthalpy, heat capacity) displayed physically meaningful temperature trends, supporting the thermal stability of the model. Hirshfeld surface and fingerprint analyses showed that crystal packing is mainly stabilized by van der Waals forces and weak C–H $\cdots$ N or C–H $\cdots\pi$ interactions, typical for diaryltriazenes. Molecular docking with the HER2 receptor (PDB ID: 3PP0) yielded a favorable binding energy (-9.8 k cal mol $^{-1}$), with key interactions involving hydrogen bonds (Asp803, Ser783) and hydrophobic contacts (Ala571, Lys753, Val734). These findings suggest potential for HER2-targeted drug development. In summary, the combined theoretical and structural results highlight the compound's dual potential in biomedical and materials science, with strong NLO response, adaptable electronic features, and promising bioactivity. Future experimental studies are encouraged to validate its application in therapeutic and optoelectronic domains.

References

- [1] P. de M. S. Figueirêdo *et al.*, “Assessment of the biological potential of diaryltriazene-derived triazene compounds,” *Sci. Rep.*, vol. 11, p. 2541, 2021.
- [2] F. Marchesi, M. Turriziani, G. Tortorelli, G. Avvisati, F. Torino, ve L. De Vecchis, “Triazene compounds: Mechanism of action and related DNA repair systems,” *Pharmacol. Res.*, vol. 56, no. 4, pp. 275-287, 2007.
- [3] N. Iqbal ve N. Iqbal, “Human epidermal growth factor receptor 2 (HER2) in cancers: Overexpression and therapeutic implications,” *Mol. Biol. Int.*, vol. 2014, p. 852748, 2014.
- [4] S. Lamichhane, R. P. Rai, A. Khatri, R. Adhikari, B. G. Shrestha, ve S. K. Shrestha, “Screening of phytochemicals as potential anti-breast cancer agents targeting HER2: An in-silico approach,” *J. Biomol. Struct. Dyn.*, vol. 41, no. 3, pp. 897-911, 2023.
- [5] R. B. O. Ouma, S. M. Ngari, ve J. K. Kibet, “A review of the current trends in computational approaches in drug design and metabolism,” *Discov. Public Health*, vol. 21, p. 108, 2024.

- [6] P. C. Agu *et al.*, "Molecular docking as a tool for the discovery of molecular targets of nutraceuticals in diseases management," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 13398, 2023. doi: 10.1038/s41598-023-40160-2
- [7] M. J. Frisch *et al.*, *Gaussian 03, Revision C.02*, Gaussian, Inc., 2004.
- [8] C. Lee, W. Yang, ve R. G. Parr, "Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density," *Phys. Rev. B*, vol. 37, no. 2, pp. 785-789, 1988. doi: 10.1103/PhysRevB.37.785
- [9] A. D. Becke, "Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange," *J. Chem. Phys.*, vol. 98, no. 7, pp. 5648-5652, 1993. doi: 10.1063/1.464913
- [10] R. Dennington, T. Keith, ve J. Millam, *GaussView, Version 5.0* [Computer software], Semichem Inc., 2009.
- [11] R. G. Parr, L. V. Szentpály, ve S. Liu, "Electrophilicity index," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 121, no. 9, pp. 1922-1924, 1999. doi: 10.1021/ja983494x
- [12] J. Tomasi, B. Mennucci, ve R. Cammi, "Quantum mechanical continuum solvation models," *Chem. Rev.*, vol. 105, no. 8, pp. 2999-3094, 2005. doi: 10.1021/cr9904009
- [13] M. J. Turner *et al.*, *CrystalExplorer17* (Version 17.5) [Computer software], University of Western Australia, 2017.
- [14] J. J. McKinnon, D. Jayatilaka, ve M. A. Spackman, "Towards quantitative analysis of intermolecular interactions with Hirshfeld surfaces," *Chem. Commun.*, no. 37, pp. 3814-3816, 2007. doi: 10.1039/B704980C
- [15] M. A. Spackman ve D. Jayatilaka, "Hirshfeld surface analysis," *CrystEngComm*, vol. 11, no. 1, pp. 19-32, 2009. doi: 10.1039/B818330A
- [16] F. L. Hirshfeld, "Bonded-atom fragments for describing molecular charge densities," *Theor. Chim. Acta*, vol. 44, no. 2, pp. 129-138, 1977. doi: 10.1007/BF00549096
- [17] K. Aertgeerts *et al.*, "Structural analysis of the mechanism of inhibition and allosteric activation of the kinase domain of HER2 protein," *J. Biol. Chem.*, vol. 286, no. 21, pp. 18756-18765, 2011. doi: 10.1074/jbc.M110.206193
- [18] O. Trott ve A. J. Olson, "AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization and multithreading," *J. Comput. Chem.*, vol. 31, no. 2, pp. 455-461, 2010.
- [19] D. Biovia *et al.*, *Discovery Studio Visualizer* (Version 17.2) [Computer software], Dassault Systèmes, 2016.
- [20] N. Karadayı, Ş. Çakmak, M. Odabaşoğlu, ve O. Büyükgüngör, "1,3-Bis(4-methylphenyl)triazene, 1-(4-chlorophenyl)-3-(4-fluorophenyl)triazene and 1-(4-fluorophenyl)-3-(4-methylphenyl)triazene," *Acta Crystallogr. Sect. E Struct. Rep. Online*, vol. 61, no. 5, pp. o303-o305, 2005. doi: 10.1107/S0108270105004373
- [21] R. G. Parr ve W. Yang, *Density-functional theory of atoms and molecules*. Oxford University Press, 1989.
- [22] W. Koch ve M. C. Holthausen, *A chemist's guide to density functional theory*, 2nd ed. Wiley-VCH, 2001.
- [23] Y. Zhao ve D. G. Truhlar, "Density functional theory for highly excited states: The role of exact exchange," *J. Chem. Phys.*, vol. 128, no. 18, p. 184103, 2008. doi: 10.1063/1.2928720
- [24] Y. Zhao, Y. Xie, ve H. F. Schaefer, "Benchmark studies of dipole moments and first hyperpolarizabilities of push-pull π -conjugated systems," *Theor. Chem. Acc.*, vol. 116, no. 1, pp. 131-137, 2006. doi: 10.1007/s00214-005-0023-6
- [25] W. Kohn ve L. J. Sham, "Self-consistent equations including exchange and correlation effects," *Phys. Rev.*, vol. 140, no. 4A, pp. A1133-A1138, 1965. doi: 10.1103/PhysRev.140.A1133
- [26] P. Politzer ve J. S. Murray, "The fundamental nature and role of the electrostatic potential in atoms and molecules," *Theor. Chem. Acc.*, vol. 108, no. 3, pp. 134-142, 2002. doi: 10.1007/s00214-002-0363-9
- [27] W. Yang ve R. G. Parr, "Hardness, softness, and the Fukui function in the electronic theory of metals and catalysis," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 82, no. 20, pp. 6723-6726, 1985. doi: 10.1073/pnas.82.20.6723
- [28] P. Geerlings, F. De Proft, ve W. Langenaeker, "Conceptual density functional theory," *Chem. Rev.*, vol. 103, no. 5, pp. 1793-1874, 2003. doi: 10.1021/cr990029p
- [29] R. G. Parr ve R. G. Pearson, "Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 105, no. 26, pp. 7512-7516, 1983. doi: 10.1021/ja00364a005
- [30] C. J. Cramer ve D. G. Truhlar, "Implicit solvation models: Equilibria, structure, spectra, and dynamics," *Chem. Rev.*, vol. 99, no. 8, pp. 2161-2200, 1999. doi: 10.1021/cr960149m
- [31] D. A. McQuarrie ve J. D. Simon, *Physical chemistry: A molecular approach*. University Science Books, 1999.
- [32] P. Atkins ve J. de Paula, *Atkins' physical chemistry*, 10th ed. Oxford University Press, 2014.
- [33] K. S. Pitzer, E. R. Lippincott ve R. F. Curl, "The Thermodynamic Properties of Organic Compounds," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 67, no. 8, pp. 1341-1350, 1945. doi: 10.1021/ja01224a002
- [34] L. A. Curtiss, K. Raghavachari, P. C. Redfern ve J. A. Pople, "Assessment of Gaussian-2 and density functional theories for the computation of enthalpies of formation," *J. Chem. Phys.*, vol. 106, no. 3, pp. 1063-1079, 1997. doi: 10.1063/1.473182
- [35] A. N. Khalilov *et al.*, "Crystal structure and Hirshfeld surface analysis of (2E)-1-phenyl-3-(4-fluorophenyl)prop-2-en-1-one," *Acta Crystallogr. Sect. E: Crystallogr. Commun.*, vol. 78, no. 2, pp. 525-529, 2022. doi: 10.1107/S2056989022000343
- [36] C. Jelsch ve Y. B. M. Bisseyoub, "Deciphering the driving forces in crystal packing by analysis of intermolecular interactions in aromatic hydrocarbons," *IUCrJ*, vol. 10, no. 5, pp. 557-567, 2023. doi: 10.1107/S2056989023005043
- [37] B. Bissantz, B. Kuhn ve M. Stahl, "A medicinal chemist's guide to molecular interactions," *J. Med. Chem.*, vol. 53, no. 14, pp. 5061-5084, 2010. doi: 10.1021/jm100112j
- [38] S. Başak ve C. C. Ersanlı, "Structure elucidation of Schiff base-containing compound by quantum chemical methods," *Int. Sci. Vocat. Stud. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 129-136, 2024. doi: 10.47897/bilmes.1553500

- [39] C. C. Ersanlı ve S. Başak, "Quantum Mechanical Calculations and Molecular Docking Simulation Studies of *N*-(5-chloro-2-oxobenzyl)-2-hydroxy-5-methylanilinium Compound," *Int. Sci. Vocat. Stud. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 162-177, 2024. doi: 10.47897/bilmes.1573560
- [40] S. Öztürk, T. Aycan, Z. Demircioğlu ve C. C. Ersanlı, "Quantum Mechanical Calculations, Hirshfeld Surface Analysis, Molecular Docking, ADME and Toxicology Studies of the Ethyl 4-chloro-2-[(4-nitrophenyl)hydrazono]-3-oxobutrate Compound," *Int. Sci. Vocat. Stud. J.*, vol. 7, no. 2, pp. 109-121, 2023. doi: 10.47897/bilmes.1385170
- [41] D. B. Kitchen, H. Decornez, J. R. Furr ve J. Bajorath, "Docking and scoring in virtual screening for drug discovery: methods and applications," *Nat. Rev. Drug Discov.*, vol. 3, no. 11, pp. 935-949, 2004. doi: 10.1038/nrd1549
- [42] D. E. V. Wilman, "Triazenes as antitumor agents," *Med. Res. Rev.*, vol. 8, no. 1, pp. 1-20, 1988. doi: 10.1002/med.2610080102
- [43] C. N. Cavasotto ve A. J. W. Orry, "Ligand docking and structure-based virtual screening in drug discovery," *Curr. Top. Med. Chem.*, vol. 7, no. 10, pp. 1006-1014, 2007. doi: 10.2174/156802607780906468

A Multidimensional Investigation from Electronic Properties to Biological Activity of 2-[(4-Hydroxyphenyl)iminomethyl]thiophene by DFT, HOMO-LUMO, MEP, NLO, NBO, Mulliken, Hirshfeld and Molecular Docking Analyses

Cem Cüneyt Ersanlı ^{a,1}, Sultan Başak ^b

^a Sinop University, Faculty of Arts and Science, Department of Physics, Sinop, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-8113-5091

^b Sinop University, Institute of Postgraduate Education, Department of Chemistry, Sinop, Türkiye
ORCID ID: 0000-0003-0541-3667

Abstract

Ever since they were first discovered, Schiff bases have been the subject of much attention due to their functional chemical character and intensive interdisciplinary applications, particularly in medicinal chemistry. The compounds are gaining interest due to their ability to provide stable coordination complexes and exhibit a vast array of biological activities, such as antimicrobial, anticancer, and antiviral activities. In this contribution, the structure of 2-[(4-hydroxyphenyl)iminomethyl]thiophene, (**I**), a compound previously described in the literature, was ascertained with great accuracy employing up-to-date quantum chemical calculations to better understand its electronic behavior and reactivity. In addition, the antiviral, anticancer, and anti-Alzheimer activity of the compound was thoroughly investigated employing a battery of in vitro and computational assays. The results proved the active character of the compound against various biological targets, and that it was a multiradial drug candidate. Furthermore, ADME-Tox properties were examined to evaluate the pharmacokinetic profile and toxicity of the compound. Favorable ADME properties and a low likelihood of toxicity highlight the molecule's suitability for continued development. The research showed the chemical stability of the molecule, its high hyperconjugation and strong intramolecular stability as factors contributing to its overall strength. These structural features also hold out promise for drug development since they can lead to increased efficacy and long-lasting activity in biological systems. Furthermore, molecular docking simulations corroborated the efficacy of the compound as a potential ligand that could interact with key biological macromolecules, rendering it a highly effective ligand with high binding affinity. This also contributes to its potential as a lead compound for new therapeutic drugs. Lastly, this research not only describes the structure and properties of (**I**), but also provides a pragmatic window through its pharmacological potential, worthy of experimental and clinical studies to explore fully its promise in drug discovery.

Keywords: “Computational quantum methods, Hirshfeld surface characterization, molecular docking, ADME properties, toxicity analysis.”

1. Introduction

Hugo Schiff, a German chemist, was the first to synthesize Schiff bases by condensing primary amines with aldehydes or ketones, utilizing the azeotropic distillation method [1]. Schiff bases have a general formula represented as $R_1R_2C=NR_3$, where R_1 and R_2 groups can be alkyl, aryl, or heterocyclic groups with various substituents. In Schiff base synthesis, the nucleophilic nitrogen of the primary amine attacks the electrophilic carbon of the carbonyl with the generation of a hemiaminal intermediate. The dehydration of the intermediate yields an imine compound [2]. In the initial step of this general reaction mechanism, the aldehyde or ketone reacts with the primary amine to yield a tetrahedral intermediate known as a carbinolamine. This intermediate undergoes acid- or base-catalyzed dehydration. Upon isolation of the product or removal of water, the reaction completes. The stability of Schiff bases may vary depending upon the nature of the aryl or alkyl substituents. Aryl-substituted Schiff bases are more stable than alkyl-substituted ones [3]. Moreover, Schiff bases derived from aromatic aldehydes are more stable than those derived from aliphatic aldehydes due to the possibility of extensive conjugation. Schiff bases derived from ketones are more stable than those derived from aldehydes due to reduced steric hindrance. The ease of synthesis, structural versatility, and strong electrophilic character of Schiff bases have generated interest in their research and their investigation using interdisciplinary approaches [2]. These properties have made Schiff bases omnipresent ligands in coordination chemistry [4]. Apart from these inherent reasons, Schiff bases also possess high reactivity, strong biological activity [5], and remarkable versatility [6], which further increase their significance. These properties have not only intensified active research on Schiff bases but also promoted

¹ Corresponding Author
E-mail Address: ccersanli@sinop.edu.tr

the advancement of coordination chemistry [7]. Schiff bases have thus assumed an interdisciplinary role and have attracted a great deal of interest among researchers for applications as optical chemical sensors [8], as efficient catalysts [9], and as anti-Alzheimer [10,11], anticancer [12-14], antibacterial [15-17], and antiviral [18-21] agents.

As per World Health Organization (WHO), cancer is a heterogeneous group of disorders characterized by the unregulated proliferation of abnormal cells, capable of initiating in virtually any tissue. These cells often infiltrate adjacent structures and may disseminate to distant organs through metastasis. On a global scale, cancer constitutes a major health concern and is the second foremost cause of death [22]. Unlike normal cells, cancer cells not only possess the ability to grow infinitely but also other hallmark features like the ability to evade apoptosis, to induce angiogenesis, and the ability to escape cell cycle checkpoints that under normal circumstances regulate cell advancement. This sequential process of change is called oncogenesis and can be caused by both genetics and the environment [23]. For the human body to maintain homeostasis, all physiological processes must function flawlessly. Any deviation caused by genetic mutation or environmental stress could result in numerous states of disease. For instance, receptor tyrosine kinases (RTKs), coded for by approximately two-thirds of the human genome's tyrosine kinase genes, play a crucial role in cellular signaling [24]. Exposed on the cell membrane, RTKs bind to particular ligands and convey external signals into the cell to initiate an intracellular cascade reaction. The signaling cascades are vital in sustaining homeostasis and controlling fundamental life processes. Some RTKs are required for normal cellular physiology. Genetic or environmental changes might, however, interfere with these proteins to cause disease, including malignancy [25]. c-KIT or CD117 is a family of proto-oncogene RTKs that encode the c-KIT receptor. It was initially identified in 1986 as the cellular homolog of the viral oncogene v-KIT found in the Hardy-Zuckerman 4 feline sarcoma virus [26]. c-KIT must bind to its specific ligand, stem cell factor (SCF), to be activated [27]. c-KIT is a transmembrane receptor protein consisting of an extracellular domain responsible for ligand binding, a single transmembrane segment, and intracellular domains with tyrosine kinase activity [28]. c-KIT is present in several types of cells throughout the body. Upon binding to SCF, c-KIT becomes activated, and the downstream signaling pathways are induced that regulate important processes such as proliferation, survival, and migration-functions essential for the maintenance of physiological homeostasis [29]. However, gain-of-function mutations in c-KIT can lead to constitutive activation of c-KIT without SCF binding. This SCF-independent activation can disrupt the normal regulatory signaling pathways and cause loss of homeostasis [30]. They have been linked with a variety of different cancers, some of which include certain types of melanoma [31], gastrointestinal stromal tumors (GISTs), acute myeloid leukemia (AML) [32], and seminomas.

Ebolaviruses (EBOV) are negative-sense RNA *Filoviridae* family viruses. The viruses are mostly transmitted through direct contact with body fluids or through close contact with the bodies of infected patients. EBOV infections have been noted to cause deadly disease with high mortality rates [33]. The 2013-2016 West African outbreak underscored Ebolavirus's high epidemic potential, with more than 28,000 cases and around 11,000 deaths reported [34,35]. The virus was originally named after the Ebola River, near where it was first identified. EBOV primarily targets the immune system, resulting in a sudden reduction in lymphocyte counts. This immune suppression typically results in disseminated intravascular coagulation (DIC) that is accountable for multi-organ failure [36]. The incubation period of the disease ranges from 2 to 21 days, and the onset of symptoms is extremely similar to the flu. In the progressive evolution of the disease, vomiting, diarrhea, and liver and kidney damage are observed [37]. Drugs approved for the treatment of EBOV include monoclonal antibodies. However, the cost of these treatments and their cold chain shipping requirements greatly limit access, particularly to impoverished communities [38]. Therefore, small-molecule drugs that can act against specific phases of the viral life cycle are a more effective and affordable treatment option [39].

Neurodegenerative diseases are characterized by the gradual and progressive loss of specific neuronal populations within distinct regions of the central nervous system. These disorders represent a major cause of mortality in industrialized nations, especially among the elderly [40]. Although each of these ailments has unique symptoms and pathophysiology, they share much in common with respect to the causative factors [10]. One of the most popular neurodegenerative diseases is Alzheimer's disease (AD) that was first described in 1901 by Dr. Alois Alzheimer in his report of a patient's symptoms [41]. According to global statistics, AD has most frequently been linked to elderly individuals, with an estimated 5 million new cases every year. Estimated statistics reveal that by the year 2050, one in every 85 individuals globally could have AD [42]. AD is associated with memory loss, inability to form new memory, neurotransmitter imbalances, and irreversible damage of cholinergic neurons, all of which affect the neuron communication [43]. Despite the many theories that have arisen regarding the etiology of AD, one of the most compelling contenders is the cholinergic hypothesis [44]. This postulates that a fall in the concentration of acetylcholine (ACh) has the potential to trigger cognitive dysfunctions and also lead to the onset of neurodegenerative diseases. ACh is metabolized by the enzyme acetylcholinesterase (AChE), which thus has the primary task of determining the concentration of accessible ACh in the synaptic cleft [10]. ACh is found in most of the central nervous system, including the brain, where it lives as a fundamental neurotransmitter. Decreased ACh synthesis and increased neural hydrolysis retard neural transmission [45]. Therefore, a balance within this process is seen as essential to the regulation of the progression of neurodegenerative conditions. Advances in technology and research are enabling new inhibitors targeted to and regulating these processes to be developed [46,47].

In this study, the physical and chemical properties of the Schiff base compound 2-[(4-hydroxyphenyl)iminomethyl]thiophene, (I), whose structure was previously elucidated experimentally by X-ray diffraction by Kazak et al. [48], were investigated using quantum chemical calculations. In addition, the anticancer, antiviral and anti-Alzheimer activities of the compound were modeled using molecular docking methods and the ADME-Tox properties were further elucidated. Special emphasis is placed on

its interaction with proteins associated with Alzheimer's disease and Ebola virus, due to their urgent clinical significance and the structural compatibility of Schiff bases with key molecular targets involved in these pathologies. AD is a progressive neurodegenerative disorder linked to reduced acetylcholine levels, where AChE inhibitors are primary therapeutic agents [49]. Schiff bases with aromatic and heterocyclic groups have demonstrated potent AChE inhibition in several prior studies [50,51], motivating their further investigation. Similarly, EBOV, a member of the Filoviridae family, causes severe hemorrhagic fever with high mortality. The development of small molecules targeting key viral proteins is essential, particularly due to the high cost and storage limitations of existing monoclonal antibody therapies [52]. Recent research highlights Schiff bases as effective scaffolds for the design of viral enzyme inhibitors [53]. Thus, exploring compound **1**'s binding affinity with Ebola-related proteins represents a logical and timely extension of Schiff base-based antiviral drug discovery.

2. Materials and Method

In current theoretical research, physical, chemical, and biological aspects of the (**1**) molecule [48] were studied. The research included Hirshfeld surface analysis, frontier molecular orbital (HOMO-LUMO) analysis, molecular electrostatic potential (MEP) mapping, nonlinear optical (NLO) properties, natural bond orbital (NBO) analysis, Mulliken charge distribution, and prospective antiviral, anticancer, and anti-Alzheimer activity of the compound. All the theoretical calculations were carried out using the density functional theory (DFT) method in the Gaussian 03 package [54]. The B3LYP hybrid functional [55], which is based on Becke's exchange functional [56] and the Lee-Yang-Parr correlation functional [57], was employed in conjunction with the 6-311++G(d,p) basis set [58]. The molecule's structure was optimized in the gas phase, and the results were visualized using the GaussView 4.1.2 program [59]. To examine intermolecular interactions and packing in crystals, the CrystalExplorer 17.5 software [60] was utilized. Hirshfeld surfaces [61-63] and two-dimensional fingerprint plots [62] were generated with the compound's crystallographic input file (CIF). Protein structures of c-KIT, Ebola glycoprotein, and acetylcholinesterase for the biological tests were downloaded from the Protein Data Bank [Ebola virus glycoprotein PDB ID: 4IBB [64], c-KIT PDB ID: 4UOI [65], and acetylcholinesterase PDB ID: 1QTI [66]. Docking studies utilized AutoDock Vina 1.5.6 [67], and the resulting interactions were visualized with Biovia software [68]. Pharmacokinetic and toxicological features (ADME-Tox) of the compound were predicted using the SwissADME platform [69].

3. Results and discussion

3.1. Optimized Molecular Structure

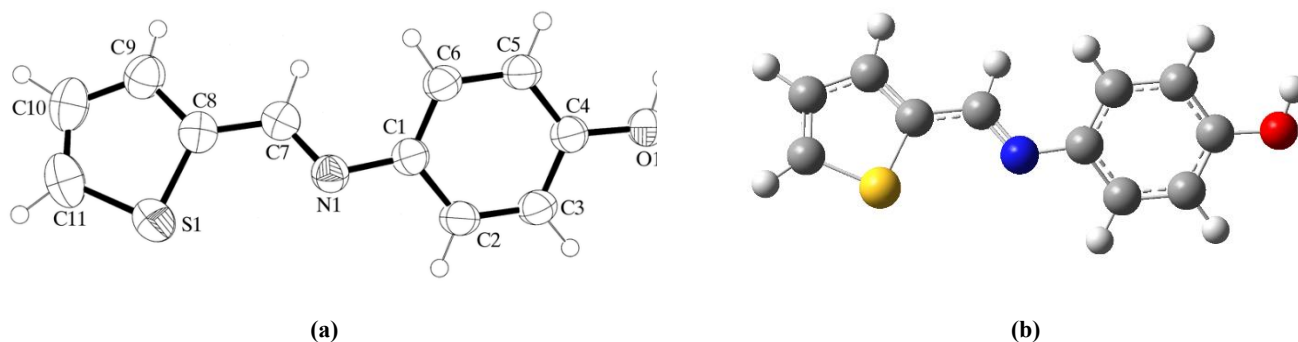


Fig. 1. (a) ORTEP-III representation of the crystal structure of (**1**) (b) representation of the optimized molecular structure.

The optimized structure of the title compound is Fig. 1. The compound has a thiophene ring and a benzene ring, with interplanar angle calculated as 35.51°. It has been found that Schiff bases exhibit two different tautomeric forms: the keto-amine and enol-imine tautomers [10]. There are some ways in which a tautomeric form adopted by a molecule can be identified, one of which is geometrical analysis. By examining specific bond lengths and taking into account double bond character, the primary tautomeric structure can be inferred. The existence of a comparatively short C=N bond indicates the enol-imine structure. Table 1 contains bond lengths, bond angles, and torsional angles in the title compound, while Fig. 1 represents the molecular structure that was achieved after geometry optimization. From the inspection of Fig. 1 and Table 1, it is found that the C7–N1 bond possesses significant double bond character with a calculated bond length of 1.280 Å and experimental bond length of 1.282 (2) Å. The shortish C–N bond provides proof of the existence of a C=N double bond, confirming the enol-imine tautomer. For the O1–C4 bond, a bond lengths of theoretical 1.370 and experimental 1.358 (2) Å were seen Table 1. This comparatively long C–O bond, combined with the abbreviated C=N bond, once again predominates in the enol-imine tautomeric form of the molecule. Inspection of the literature shows that the equivalent structures with the enol-imine tautomeric form also have normal bond lengths [70-73].

Table 1. X-ray diffraction method and DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) calculated selected geometric parameter values (Å, °).

Bond Length and Bond Angles	Experimental	Theoretical
S1-C11	1.705 (3)	1.730
S1-C8	1.712 (2)	1.750
O1-C4	1.358 (2)	1.370
N1-C7	1.282 (2)	1.280
N1-C1	1.422 (2)	1.403
C7-C8	1.447 (3)	1.445
C8-C9	1.369 (3)	1.380
C9-C10	1.400 (3)	1.420
C10-C11	1.336 (4)	1.369
C7-N1-C1	119.69 (16)	120.85
N1-C7-C8	123.52 (18)	122.64
C6-C1-N1	124.37 (16)	124.07
O1-C4-C5	123.21 (16)	122.73
O1-C4-C3	117.72 (16)	117.59
C9-C8-S1	110.36 (16)	110.90
C10-C11-S1	112.41 (19)	112.39

3.2. Frontier Molecular Orbitals (FMOs)

FMOs play important roles in understanding the chemical reactivity, stability, and electronic characteristics of a molecule. FMOs are mostly studied at two levels, i.e., highest occupied molecular orbital (HOMO) and lowest unoccupied molecular orbital (LUMO). The HOMO is the most energetic orbital to donate an electron, while the LUMO is the lowest energy orbital to accept an electron [74,75]. For (**I**), HOMO and LUMO energies were -5.8001 eV and -2.0038 eV, respectively. This provides us an energy gap (ΔE) of ca. 3.7963 eV between the two orbitals. HOMO-LUMO energy gap is inversely related to the chemical stability of the molecule; therefore, the lower ΔE value indicates that the compound is more chemically reactive and electron transition sensitive [76]. This type of analysis plays a very important role in molecular electronics, photovoltaic materials, and prediction of biological activity. Particularly, the distribution of HOMO and LUMO in conjugated systems directly correlates with light absorption properties of the molecule [77]. Under this situation, localization of the HOMO solely on the phenolic ring suggests that it has the potential to be an electron donor, whereas localization of the LUMO around the imine group suggests that this region is prone to accepting an electron. These orbitals' transitions may influence the optoelectronic properties of the molecule and highlight its potential application in organic semiconductors or sensors [78]. Further, global reactivity descriptors derived using the HOMO-LUMO gap -electronegativity, chemical hardness, and softness - are available to predict the interaction of the molecule with other molecules.

3.3. Molecular Electrostatic Potential (MEP)

Information on the distribution of the charge density in a molecule and thus its chemical reactivity pattern is crucial for the prediction of how it will interact with other entities. Specifically, identification of potential electrophilic and nucleophilic attack sites enables the location of the molecule's reactive centers. One of the most commonly used methods for this is the MEP mapping, which is plotted on a constant electron density surface [79]. MEP maps allow for three-dimensional representation of a molecule's electrostatic pocket and depict probable distribution with different color codes. Blue regions are typically of maximum positive electrostatic potential (nucleophilic attack-susceptible regions), while red regions are of maximum negative potential (electrophilic attack-susceptible regions) [80]. In this study, the MEP map of (**I**) compound was plotted based on electrostatic potential values ranging from -6.280 a.u. to +6.280 a.u. (Fig. 2). Analysis of the map shows that the areas with the most negative potentials, red-coded, are localized over regions near the oxygen-containing hydroxyl group and imine group. This is an indication that these areas are susceptible to electrophilic attacks. Conversely, potential positives, which are colored in blue, represent the locations of possible positives and are mostly situated outside the thiophene ring. Visual and quantitative data from MEP analysis have proven to be valuable in predicting possible interaction mechanisms with biological targets, identification of ligand-receptor binding sites, and guiding drug design [81].

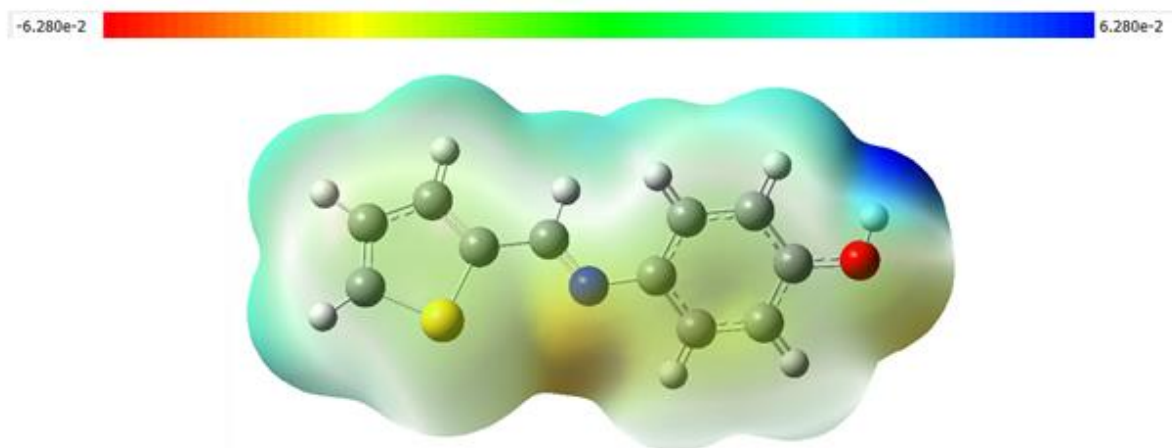


Fig. 2. MEP map of (I).

3.4. Non-Linear Optical (NLO) Properties

NLO properties, which impact the optical characteristics and stability of structures, are studied in fields such as physics, chemistry, biochemistry, and telecommunications [82]. Polarizability and hyperpolarizability values obtained from NLO calculations are necessary to measure the performance of the structure in these fields. NLO properties are important in the context that they not only determine the optical properties but also assist in confirming the presence of valence electrons within the material because valence electrons contribute with highest in polarizability and hyperpolarizability [83]. Urea is commonly employed as a reference compound in the literature when comparing dipole moment, polarizability, and hyperpolarizability values. Reported values for urea include a dipole moment of 1.3732 D, a polarizability of $3.8312 \text{ \AA}^3$, and a hyperpolarizability of 3.7289 e.s.u. [84].

Table 2. Dipole moment, polarizability (a.u.), and hyperpolarizability (e.s.u.) of (I).

μ_x	-0.3362	β_{xxx}	-2.2192×10^{-29}
μ_y	1.1447	β_{xxy}	1.0709×10^{-30}
μ_z	0.0058	β_{xyy}	2.6966×10^{-31}
		β_{yyy}	4.6554×10^{-31}
α_{xx}	313.1891	β_{xxz}	-9.6091×10^{-31}
α_{xy}	-6.8212	β_{xyz}	1.4339×10^{-31}
α_{yy}	152.2924	β_{yyz}	-2.2556×10^{-31}
α_{xz}	1.8228	β_{xzz}	-5.8332×10^{-31}
α_{yz}	0.1161	β_{yzz}	6.6171×10^{-32}
α_{zz}	92.4615	β_{zzz}	13.7150×10^{-33}

When one examines Tables 2 and 3, one observes that the title compound exhibits greater polarizability and hyperpolarizability values than those of urea, in addition to its overall dipole moment.

Table 3. Average linear polarizability, polarizability anisotropy ($\text{\AA}^3$), and hyperpolarizability (e.s.u.) values of (I).

Mean Linear Polarizability (α), ($\text{\AA}^3$)	27.57
Polarizability Anisotropy ($\Delta\alpha$), ($\text{\AA}^3$)	85.80
Hyperpolarizability (β), (e.s.u.)	7.3×10^{-29}

3.5. Natural Bond Orbital (NBO) analysis

NBO analysis, based on the calculation of the shapes of orbitals in a molecular environment, was initially developed by Weinhold [85]. In order to define such orbital shapes, the single-electron density matrix is used, and bond formation is obtained through electron density shared between atoms [86]. Thus, NBO analysis takes a central position in computational chemistry as it provides information on bond formation nature and identifies donor and acceptor atoms based on electron density. The NBO analysis results are tabulated in Table 4. The values in Table 4 were obtained through second-order perturbation treatment of the Fock matrix [87]. E(2) values of 15 kcal mol^{-1} or greater are tabulated in Table 4.

Table 4. NBO analysis of the compound (I).

Donor (i)	Acceptor (j)	E(2) (kcalmol ⁻¹)	$\epsilon(j) - \epsilon(i)$ (a.u.)	F(i,j) (a.u.)
BD(2) C4-C5	BD*(2) C1-C6	21.41	0.29	0.072
BD(2) C1-C6	BD*(2) C4-C5	19.09	0.27	0.065
BD(2) C1-C6	BD*(2) C2-C3	19.80	0.29	0.068
BD(2) C2-C3	BD*(2) C14-C5	22.22	0.27	0.071
BD(2) C2-C3	BD*(2) C1-C6	17.59	0.28	0.065
BD(2) C8-C9	BD*(2) N1-C7	19.50	0.30	0.069
BD(2) C8-C9	BD*(2) C10-C11	15.70	0.29	0.061
BD(2) C10-C11	BD*(2) C8-C9	15.96	0.29	0.064
LP(2) S1	BD*(2) C8-C9	22.25	0.26	0.068
LP(2) S1	BD*(2) C10-C11	23.46	0.25	0.071
LP(2) O1	BD*(2) C4-C5	27.02	0.35	0.093

In NBO analysis, high E(2) energy indicates good delocalization and stability. F(i,j) also rises linearly with E(2), a sign of a strong orbital interaction [88]. In the following, from Table 4, it is apparent that the largest intramolecular hyperconjugation occurs in $n(O1) \rightarrow \pi^*(C4-C5)$ interaction. This interaction is revealed to enhance stability and possess good delocalization. A good interaction with excellent delocalization is also the $n(S1) \rightarrow \pi^*(C10-C11)$ interaction.

3.6. Mulliken Charge Distribution

A common method for assessing the physical and chemical characteristics of a molecule is Mulliken charge analysis. By analyzing Mulliken charges, regions of positive and negative charge density within the structure are determined, which in turn determine electrophilic and nucleophilic regions [89]. Table 5 presents the Mulliken charge distribution for compound (I), which provides significant information regarding the electronic structure and potential reactive positions in the molecule. It is evident from the results that there are atoms with large negative charges, including the sulfur atom (S1) with a -0.324 charge and the oxygen atom (O1) with -0.244. These negative charge densities suggest that these atoms have the ability to act as nucleophilic sites and interactively as sites for electrophilic attack. Furthermore, they suggest that the carbon atom C7 bearing the imine linkage possesses a very high density of negative charge (-0.776) indicating a region of electron abundance with a possible effect on the reactivity of the molecule. Conversely, the carbon atom C9 carries the greatest positive charge (+1.002), which means it is electrophilic and most probably a target of nucleophilic attack. Other carbon atoms such as C4 (-0.513) and C10 (-1.060) also carry considerable negative charges and are yet more reflective of regions of electron density poised to add chemical activity to the molecule. The hydrogen atoms carry essentially minor positive charges, consistent with their role in bonding and relative electropositivity. Overall, the Mulliken charge distribution provides an accurate electron density map of the molecule, defining important nucleophilic and electrophilic positions. This is essential to the knowledge of chemical reactivity, interaction site for potential ligands, and overall stability of the compound. This information can be employed in guiding additional research in molecular interactions, catalysis, and biological function.

Table 5. Mulliken charges (a.u.) of the compound (I).

Atom	Charge	Atom	Charge
S1	-0.324265	C10	-1.059932
O1	-0.244303	C11	0.360001
N1	0.081367	H1	0.262708
C1	-0.047191	H2	0.166269
C2	-0.132624	H3	0.174105
C3	0.023799	H5	0.124312
C4	-0.512979	H6	0.131176
C5	0.105757	H7	0.039276
C6	-0.058659	H9	0.143941
C7	-0.775677	H10	0.124435
C8	0.167134	H11	0.249706
C9	1.001646		

3.7. Hirshfeld Surface Analysis

The Hirshfeld surface is used to determine the area occupied by a molecular structure within a crystal and divide the electron density in the crystal into different areas on the molecule [62]. The Hirshfeld surface analysis is a valuable resource for identifying intermolecular interactions within a molecule and understanding the modes of packing of crystals [90]. This analysis,

by means of several mapped surfaces, brings an improvement to understanding the molecule nature, the intermolecular contacts, and their effect on the overall structure. Fig. 3 presents the d_{norm} (a), shape index (b), and curvedness (c) maps for the title compound.

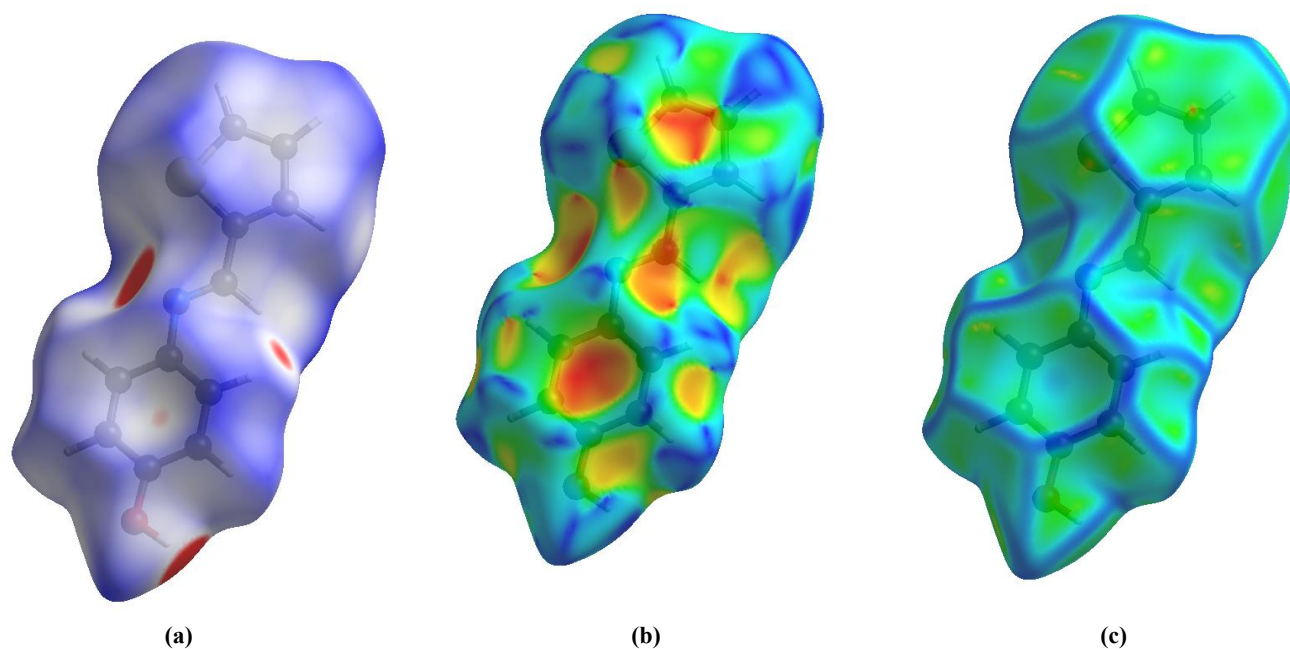


Fig. 3. d_{norm} (a), shape index (b) and curvature (c) maps of the title compound.

The d_{norm} map of a molecule is split into three different hues: red, blue, and white. Red represents negative d_{norm} values, which correspond to contacts below the sum of van der Waals radii. Blue regions represent positive d_{norm} values, *i.e.*, interactions greater than van der Waals radii, and white regions represent d_{norm} values near zero, *i.e.*, distances are approximately equal to the van der Waals radii. Fig. 3a presents the red spot map of the title compound in the range -0.2105-1.2515 a.u. On observation, there can be observed three large red spots. These regions correspond to the N1 atom involved in the imine bond, the hydrogen atom attached to the hydroxyl group of the benzene ring, and the hydrogen atom attached to C7 involved in the imine bond. The shape index map of the title compound plotted between -0.9970 and 0.9982 a.u. is illustrated in Fig. 3b. The shape index map includes red and blue triangles in which ring atoms on the molecular surface are marked and reveal π - π stacking interactions within the molecule [91]. Notably, the distinct red triangles are observed over the C11 atom of the thiophene ring and the C7 atom belonging to the imine bond. The curvedness map depicted in Fig. 3c is plotted between -4.0298 and 0.3226 a.u. In curvedness maps, broad and flat regions enclosed by blue lines can be easily identified as π - π interaction regions [92]. The curvedness map of the title compound recognizes these large, flat blue regions limited mostly on the N1 atom within the imine ring, as well as regions corresponding to hydrogen atoms attached to C-H bonds.

A second map that is obtained from the Hirshfeld surface analysis and displays the contacts within the molecule is the 2D fingerprint plot. Fig. 4 illustrates these plots.

The normal right and left wing look of the Hirshfeld surface is a sign of the presence of C-H... π interactions within the structure. This is also validated by the shape index map. The interactions also show up in the fingerprint plots of all intermolecular contacts and the C...H/H...C interactions specifically. This discovery also indicates the presence of free π electrons within the structure. Furthermore, the two large spikes of the 2D fingerprint plots are actually referring to N-H interactions [90]. This can be observed both in the fingerprint plot of all the intermolecular contacts and in the fingerprint plot for N...H/H...N contacts. The contributions of the various intermolecular interactions in the molecule are the following: H...H/H...H with 32.6%, C...H/H...C with 27.3%, S...H/H...S with 15.4%, N...H/H...N with 9.3%, O...H/H...O with 9.1%, C...C with 6.0%, S...O with 0.2%, and S...C with 0.1%. A pie chart that represents these percentages is also shown in Fig. 4.

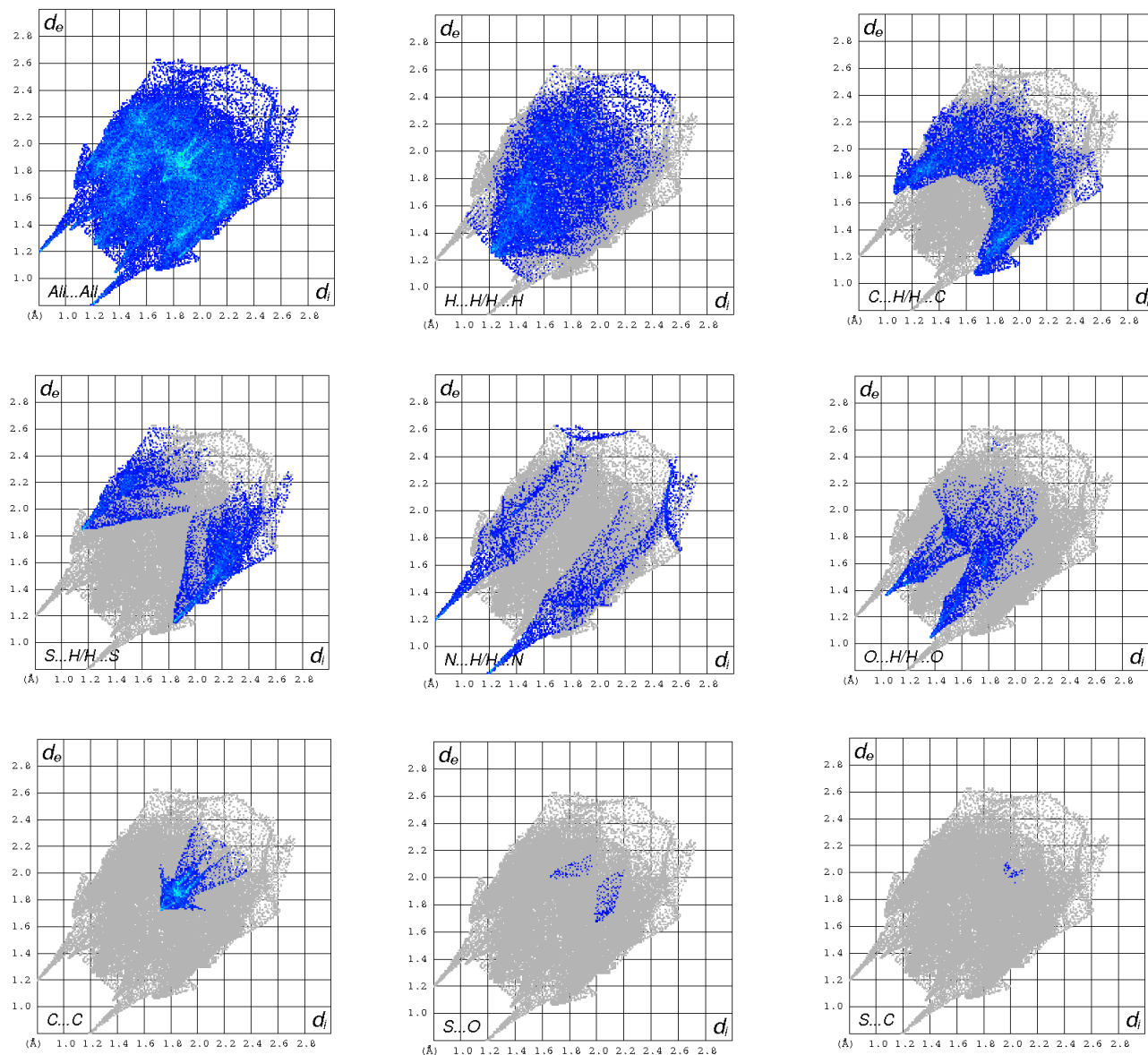


Fig. 4. 2D fingerprint maps of (I).

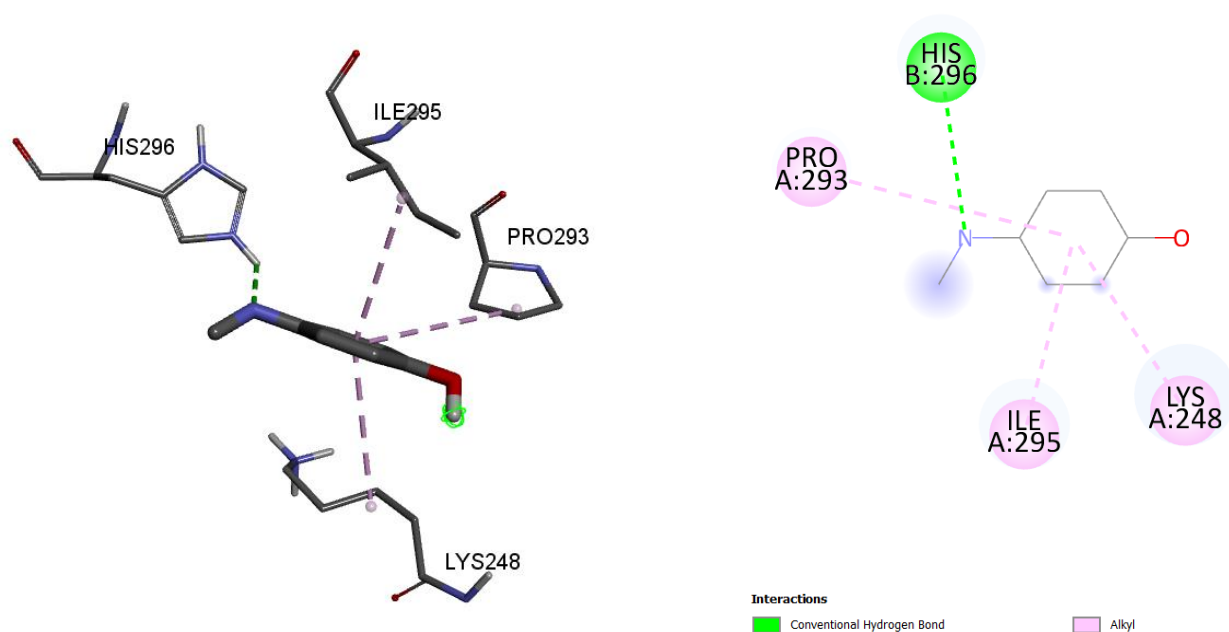
3.8. Molecular Docking Simulation

Molecular docking is a computational method employed to model the interaction between a small-molecule ligand and a macromolecular target [92]. Especially in drug development, simulating the binding of candidate molecules to target locations is cost-effective and to reduce the number of candidates to experimental evaluation. During docking, some scoring functions are utilized to estimate the binding affinity between the target and the ligand [93]. Low binding affinity is indicative of strong protein-ligand interactions, and high binding affinity is an indicator of weak binding. The binding affinity is enhanced through interactions such as hydrogen bonds, hydrophobic contacts, and so on between the ligand and protein [93]. Molecular docking is similar to experimental high-throughput screening (HTS) methods in being faster and cheaper in screening [94]. This strategy is applied widely not only for the discovery of new leads of drugs but also for drug repurposing, multi-target directed drug design, and the prediction of potential side effects [95]. In this paper, the title compound was prepared as a ligand and its antiviral, anticancer, and anti-Alzheimer activity was determined against Ebola virus, c-KIT protein, and acetylcholinesterase enzyme, respectively. Table 6 illustrates the ligand-protein interaction, whereas Fig.s 5.a, 5.b, and 5.c illustrate the 3D and 2D view of Ebola virus-ligand, c-KIT-ligand, and acetylcholinesterase-ligand interaction, respectively.

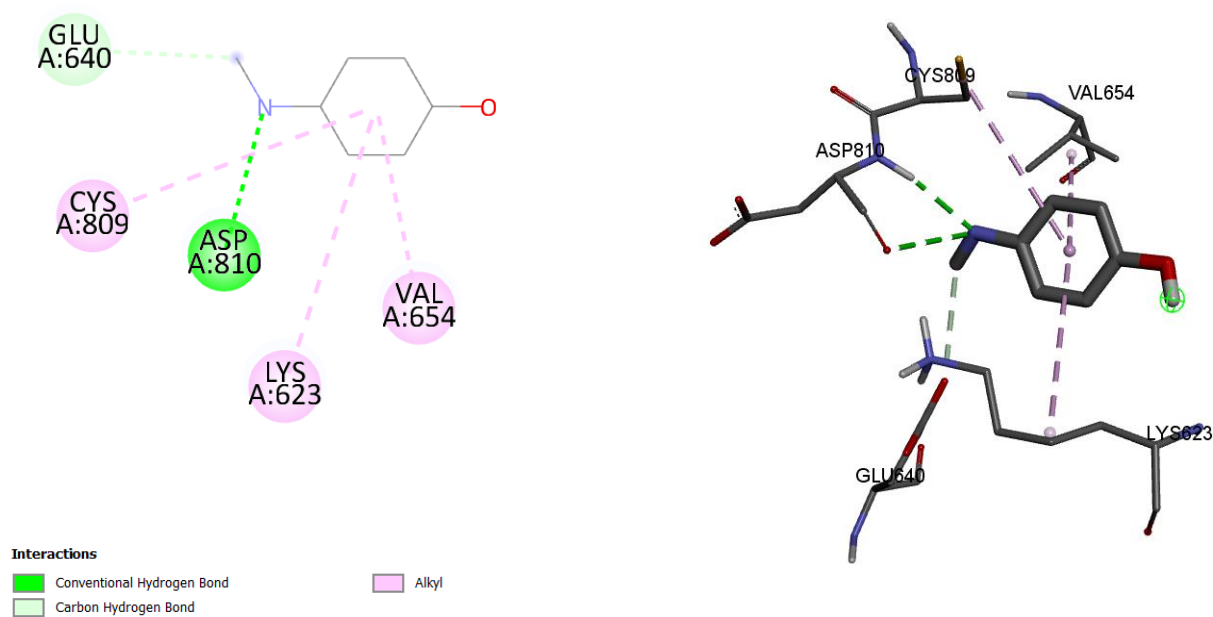
It is observed from Table 6 and Fig. 5 that the interaction and binding affinities are consistent in each system. For the Ebola virus protein-ligand interaction, amino acid residues Ile-295, Pro-293, and Lys-248 participate. For c-KIT-ligand interaction, protein residues Val-654, Cys-809, and Lys-623 participate, while for the acetylcholinesterase enzyme-ligand interaction, enzyme residues Phe-330 and Trp-84 participate in hydrophobic interaction. These hydrophobic interactions are due to exclusion of water in the apolar areas between protein and ligand, which makes binding stable by stabilizing the ligand in its binding pocket [96].

Table 6. Protein-ligand interaction data for the title compound.

Protein	Bonding Affinity (kcal mol ⁻¹)	Hydrophobic Interaction	Hydrogen Bond Interaction
Ebola virus (4ibb)	-5.3	Ile-295 Pro-293	His-296
c-KIT (4u0i)	-7.3	Lys-248 Cys-809 Lys-623 Val-654	Glu-640 Asp-810
Acetylcholinesterase (1qti)	-7.0	Phe-330 Trp-84	Gly-441 His-440 Glu-199



(a)



(b)

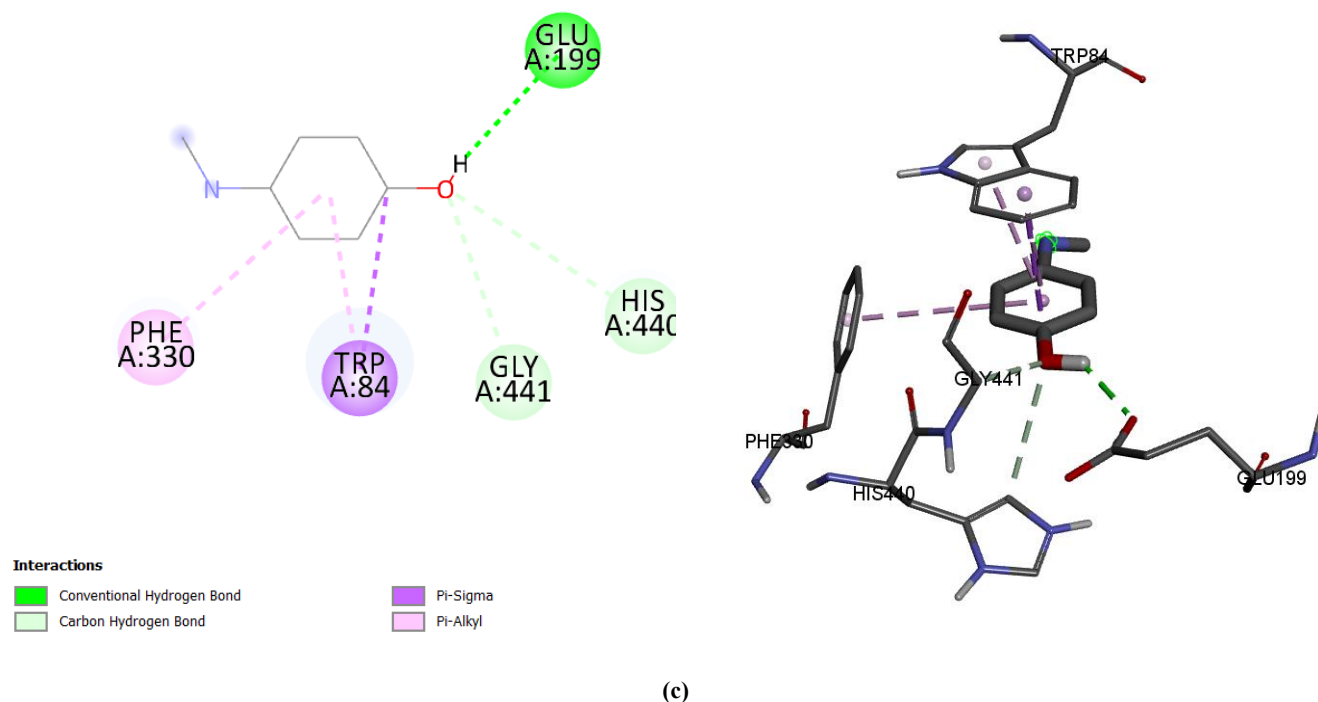


Fig. 5. (a) Ebola virüs protein-ligand (b) c-KIT-ligand (c) acetylcholinesterase enzyme-ligand interactions of (I).

Hydrogen bonding is a key type of interaction in protein-ligand complexes that plays a central role in binding site region identification and binding energy optimization [97]. In the Ebola virus protein-ligand complex, the hydrogen atom from the imidazole ring of the His-296 amino acid residue participates in an N-H $\cdots$ N hydrogen bond with the N1 atom from the ligand's imine group. In this interaction, hydrogen in the imidazole is the donor, and the N1 atom in the imine group is the acceptor. The bond distance of this hydrogen interaction was found to be 2.79 Å. In the ligand-c-KIT protein interaction, the C7 atom of the ligand belonging to the imine bond engages in the C-H $\cdots$ O hydrogen bond with the oxygen atom of the Glu-640 amino acid residue's carboxyl group. The calculated bond length was 3.51 Å. During this interaction, the C7 atom in the imine ring was the donor of the hydrogen bond, and the Glu-640 acted as the acceptor. Also, an N-H $\cdots$ O interaction was observed between the N1 atom of the imine ring of the ligand and the oxygen atom in residue Asp-810 with a bond distance of 3.31 Å. The N1 atom is the donor and the oxygen atom in Asp-810 is the acceptor. Finally, in the same protein-ligand complex, an N-H $\cdots$ N hydrogen bond was discovered between the N1 atom of the imine ring of the ligand and the amide hydrogen of Asp-810. This is a 2.40 Å hydrogen bond, wherein the amide hydrogen of Asp-810 is the donor and the N1 atom is the acceptor. In the interaction of the ligand with acetylcholinesterase enzyme, H1 atom of the ligand responsible for -OH (hydroxyl) group forms C-H $\cdots$ O interaction with oxygen atom of Glu-199 amino acid residue. Bond distance was determined to be 2.20 Å. The H1 atom acts as the donor and oxygen atom of Glu-199 as the acceptor in the interaction. In addition, a C-H $\cdots$ O interaction was observed between the carbon atom of the His-440 residue and the O1 atom of the ligand. This bond distance was calculated to be 3.78 Å, where the O1 atom was the donor and the carbon atom of the His-440 residue was the acceptor. Besides, another C-H $\cdots$ O interaction was discovered between the Gly-441 residue carbon atom and the O1 atom of the ligand with a distance of 3.18 Å. The donor is the Gly-441 carbon atom, and the acceptor is the O1 atom. All information for these interactions is presented in Table 7.

Table 7. Molecular docking-based hydrogen bonding interaction data.

Hydrogen Bond	Donor	Acceptor	Bond Length (Å)	Interaction Type
His-296-N1	His-296	N1	2.79	N-H...N
Glu-640-C7	C7	Glu-640	3.51	C-H...O
Asp-810-N1	N1	Asp-810	3.39	N-H...O
Asp810-N1	Asp-810	N1	2.40	N-H...N
Glu-199-H1	H1	Glu-199	2.20	C-H...O
His-440-O1	O1	His-440	3.78	C-H...O
Gly-441-O1	Gly-441	O1	3.18	C-H...O

3.9. ADME-Tox Study

Absorption, Distribution, Metabolism, Excretion, and Toxicity (ADME-Tox) parameters play a crucial role in drug development, as they inform the design of new drug candidates and assist in establishing appropriate dosage, dosing intervals,

and safety criteria throughout the treatment period [98]. The minimum effective dose depends on the drug's receptor affinity and its activity at the binding site. Thus, identifying the minimum dose and pharmacokinetic characteristics of candidate molecules is crucial to assess their efficacy [99]. The patient's optimal response from the daily dose given and sustaining this dose all day long correlate with the distribution characteristics of the drug [100]. Further, metabolism and excretion factors are significant in assessing toxicity, as accumulation of the drug molecule within the liver can interfere with metabolic elimination patterns [101]. Absorption can be defined as the process of a drug being conveyed to systemic circulation [99]. The drug's absorption in the body is equally important as binding to the active receptor site because poor absorption reduces the potential of the drug to yield the desired molecular effect [102]. Several key factors regulate the ADME-Tox characteristics of a drug candidate, including lipophilicity, aqueous solubility, pharmacokinetic properties, and drug-likeness. Lipophilicity is an important parameter in lead discovery and lead optimization of drug candidates as it is one of the most informative physicochemical properties regarding structure and activity of therapeutic chemicals [103]. Lipophilicity also affects pharmacodynamic and toxicologic activity [104]. Solubility is a function of lipophilicity and can be described by function of log P and melting point [105]. Based on currently used drugs and candidate molecules, it is widely accepted that molecules with lipophilicity values (log P) greater than 5 tend to undergo rapid metabolic degradation, have low solubility, and exhibit poor absorption [106,107]. Lipinski suggests that molecules with lipophilicity values below 5 should proceed to phase II trials. This concept is known as Lipinski's Rule of Five [107]. Lipinski identified four critical parameters affecting absorption and solubility: molecular weight, log P, hydrogen bond donors, and hydrogen bond acceptors. Cut-off values for these parameters are at 5 or their multiples. Based on this, Lipinski has explained that a drug candidate molecule with more than 5 hydrogen bond donors, more than 10 hydrogen bond acceptors, molecular weight more than 500, and log P more than 5 is going to have poor absorption [107]. Physicochemical and pharmacokinetic features of the title compound are summarized in Table 8, while drug-likeness features of the title compound are presented in Table 9.

Table 8. Physicochemical and pharmacokinetic properties of the title compound.

Property	Value
Number of Hydrogen Bond Acceptors	2
Number of Hydrogen Bond Donors	1
Total Polar Surface Area (TPSA)	60.83 Å
Lipophilicity (log P)	2.15
Water Solubility (log S)	-3.36
GI Absorption	High
KBB Transition	Yes
CYP1A2 Inhibitor	Yes
CYP2C19 Inhibitor	Yes
CYP2C9 Inhibitor	No
CYP2D6 Inhibitor	No
CYP3A4 Inhibitor	No
Log Kp (skin permeability)	-5.50 cm.s ⁻¹

When Table 8 is examined, the log P value, the number of hydrogen bond acceptors, and the number of hydrogen bond donors comply with Lipinski's Rule of Five [107]. The log S value is -3.36, indicating a moderate level of water solubility. Solubility is an important parameter for a drug candidate, and log S values below -4 are generally considered acceptable thresholds [108]. The GI absorption is satisfactory and as per both TPSA and log P values. The molecule satisfies all Lipinski, Veber, Ghose, Egan, and Muegge rules. The title compound permeates through the blood-brain barrier and also inhibits CYP1A2 and CYP2C19 enzymes. The log Kp value is low in relation to other values, indicating that the compound is less permeable via the skin.

Table 9. Drug similarity data for the title compound.

Property	Value
Lipinski	Yes
Ghose	Yes
Veber	Yes
Egan	Yes
Muegge	Yes
Bioavailability	0.55

4. Conclusions

In this study, the structural, electronic, and biological properties of the Schiff base compound 2-[(4-hydroxyphenyl)iminomethyl]thiophene were comprehensively investigated using quantum chemical calculations and molecular docking simulations. The results provided significant insights into the compound's potential as a drug-like molecule. Geometry optimization, performed using DFT calculations, revealed a stable molecular structure characterized by planarity in the aromatic systems and effective conjugation between the thiophene and imine groups. The optimized geometry also supported the presence of intramolecular hydrogen bonding, contributing to the overall stability of the molecule. FMO analysis indicated a moderate HOMO–LUMO energy gap, suggesting good chemical reactivity and kinetic stability. The mapped MEP highlighted the imine nitrogen (N1) and hydroxyl oxygen (O1) as key reactive centers, with NBO analysis confirming the presence of strong donor–acceptor interactions and hyperconjugation effects that enhance the molecule's stability and reactivity. NLO analysis revealed that the compound exhibits significantly higher polarizability and hyperpolarizability compared to the urea standard, indicating its suitability for optoelectronic applications. Hirshfeld surface analysis provided further confirmation of the molecule's stable packing and significant intermolecular interactions, particularly hydrogen bonding and π – π stacking, which influence its crystal behavior and solid-state stability. Molecular docking studies were conducted to evaluate the biological potential of the compound against three targets: the tyrosine kinase receptor c-KIT (associated with cancer), the Ebola virus glycoprotein, and human acetylcholinesterase (AChE, associated with Alzheimer's disease). The docking results demonstrated favorable binding affinities and key interactions with active site residues, such as hydrogen bonding with Glu640 in c-KIT, hydrophobic interactions with GP1 subunits in EBOV, and π – π stacking with Trp86 and Tyr337 in AChE. These interactions suggest that the compound could inhibit target proteins effectively. ADME-Tox analysis revealed that the compound possesses favorable pharmacokinetic properties, including high predicted oral bioavailability, good gastrointestinal absorption, and no violation of Lipinski's rule of five. Additionally, the compound was predicted to be non-mutagenic, non-carcinogenic, and have low predicted toxicity risks, supporting its potential as a safe therapeutic agent.

In summary, the study demonstrates that 2-[(4-hydroxyphenyl)iminomethyl]thiophene is a chemically stable and biologically active compound with promising drug-like properties. Its anticancer, antiviral, and anti-Alzheimer activities, supported by docking and ADME-Tox data, indicate its potential as a candidate for future drug development efforts and preclinical evaluation.

References

- [1] H. Schiff, "Investigations on salicyl derivatives," *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, vol. 150, no. 2, pp. 193–200, 1869.
- [2] R. Meena, P. Meena, A. Kumari, N. Sharma, and N. Fahmi, "Schiff Base in Organic, Inorganic and Physical Chemistry," in *Schiff Bases and Their Metal Complexes: Synthesis, Structural Characteristics and Applications*, T. Akitsu, Ed. IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.108396.
- [3] Z. Hussain, E. Yousif, A. Ahmed, and A. Altaie, "Synthesis and characterization of Schiff's bases of sulfamethoxazole," *Organic and Medicinal Chemistry Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 1–4, 2014. doi: 10.1186/2191-2858-4-1.
- [4] S. L. Sangle, "Introduction to Schiff base," in *Schiff Base in Organic, Inorganic and Physical Chemistry*, T. Akitsu, Ed. IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.104134.
- [5] S. K. Raju, A. Settu, A. Thiyagarajan, D. Rama, P. Sekar, and S. Kumar, "Biological applications of Schiff bases: An overview," *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, vol. 21, no. 3, pp. 203–215, 2022. doi: 10.30574/gscbps.2022.21.3.0484.
- [6] A. M. Abu-Dief, M. Ibrahim, and A. Mohamed, "A review on versatile applications of transition metal complexes incorporating Schiff bases," *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 119–133, 2015. doi: 10.1016/j.bjbas.2015.05.004
- [7] F. Tisato, F. Refosco, and G. Bandoli, "Structural survey of technetium complexes," *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 135–136, pp. 325–397, 1994. doi: 10.1016/0010-8545(94)80072-3
- [8] A. L. Berhanu, M. Gaurav, I. Mohiuddin, A. K. Malik, J. S. Aulakh, V. Kumar, and K. H. Kim, "A review of the applications of Schiff bases as optical chemical sensors," *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 116, pp. 74–91, 2019. doi: 10.1016/j.trac.2019.04.025
- [9] S. A. Dalia, F. Afsan, M. S. Hossain, M. N. Khan, C. Zakaria, M. E. Zahan, and M. Ali, "A short review on chemistry of Schiff base metal complexes and their catalytic application," *International Journal of Chemical Studies*, vol. 6, no. 3, pp. 2859–2866, 2018.
- [10] C. C. Ersanlı and S. Başak, "Quantum Mechanical Calculations and Molecular Docking Simulation Studies of N-(5-chloro-2-oxobenzyl)-2-hydroxy-5-methylanilinium Compound," *International Scientific and Vocational Studies Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 162–177, 2024. doi: 10.47897/bilmes.1573560
- [11] H. M. Alkahtani, A. A. Almhizia, M. A. Al-Omar, A. J. Obaidullah, A. A. Zen, A. S. Hassan, and W. M. Aboulthana, "In vitro evaluation and bioinformatics analysis of Schiff bases bearing pyrazole scaffold as bioactive agents: Antioxidant, anti-diabetic, anti-Alzheimer, and anti-arthritic activities," *Molecules*, vol. 28, no. 20, p. 7125, 2023. doi: 10.3390/molecules28207125
- [12] T. Alorini, I. Daoud, A. N. Al-Hakimi, F. Alminderej, and A. E. Albadri, "An experimental and theoretical investigation of antimicrobial and anticancer properties of some new Schiff base complexes," *Research on Chemical Intermediates*, vol. 49, no. 4, pp. 1701–1730, 2023. doi: 10.1007/s11164-022-04946-1

- [13] Y. Gou, J. Li, B. Fan, B. Xu, M. Zhou, and F. Yang, "Structure and biological properties of mixed-ligand Cu(II) Schiff base complexes as potential anticancer agents," *European Journal of Medicinal Chemistry*, vol. 134, pp. 207-217, 2017. doi: 10.1016/j.ejmech.2017.03.022
- [14] M. Köse, G. Ceyhan, M. Tümer, İ. Demirtaş, İ. Gönül, and V. McKee, "Monodentate Schiff base ligands: Structural characterization, photoluminescence, anticancer, electrochemical, and sensor properties," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 137, pp. 477-485, 2015. doi: 10.1016/j.saa.2014.08.124
- [15] A. Garg, D. Dureja, A. Vijeata, G. R. Chaudhary, S. Berry, S. Chaudhary, and A. Bhalla, "Synthesis of novel α -carboxylate- β -bismethylsulfanyl pyrazolyl Schiff base derivatives: Targeting DNA gyrase for antibacterial activity," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1337, p. 141954, 2025. doi: 10.1016/j.molstruc.2025.141954
- [16] N. Isalm *et al.*, "Exploration of the synthesis, crystal structure, Hirshfeld surface analysis, binding properties, antibacterial activities, and molecular docking of a Schiff base nickel(II) complex," *Journal of Molecular Structure*, vol. 140294, 2024. doi: 10.1016/j.molstruc.2024.140294
- [17] H. A. Hasan, S. M. Mahdi, and H. A. Ali, "Tetradentate azo Schiff base Ni(II), Pd(II), and Pt(II) complexes: Synthesis, spectral properties, antibacterial activity, cytotoxicity, and docking studies," *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, vol. 38, no. 1, pp. 99-111, 2024. doi: 10.4314/bcse.v38i1.7
- [18] D. Pardaeva *et al.*, "Spectral characterization and antibacterial, antifungal, antiviral activities of salicyl-based new Schiff bases and their Co(II), Ni(II), Cu(II), Zn(II), and Pd(II) complexes," *Revue Roumaine de Chimie*, vol. 69, no. 1-2, pp. 83-96, 2024. doi: 10.33224/rch.2024.69.1-2.10
- [19] M. Azzouzi *et al.*, "Synthesis, crystal structure, and antiviral evaluation of new imidazopyridine-Schiff base derivatives: In vitro and in silico anti-HIV studies," *RSC Advances*, vol. 14, no. 50, pp. 36902-36918, 2024. doi: 10.1039/d4ra07561g
- [20] R. H. Taha *et al.*, "Impact of Fe(III) and Ce(III) ions on pharmacological properties of novel Schiff base ligand: Anticancer, antiviral, antioxidant, antifungal investigations and computational insights," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 427, p. 127382, 2025. doi: 10.1016/j.molliq.2024.127382
- [21] M. Sarfraz *et al.*, "New pyrimidinone-bearing aminomethylenes and Schiff bases as potent antioxidant, antibacterial, SARS-CoV-2, and COVID-19 main protease (MPro) inhibitors: Design, synthesis, bioactivities, and computational studies," *ACS Omega*, vol. 9, no. 24, pp. 25730-25747, 2024. doi: 10.1021/acsomega.3c09393
- [22] M. Yılmaz, "Cancer epidemiology," in *Cancer Genetics and Molecular Biology*, İ. Değirmenci, Ed. Istanbul: Nobel, 2022, pp. 3-25.
- [23] Özbayer, "Carcinogenesis," in *Cancer Genetics and Molecular Biology*, İ. Değirmenci, Ed. Istanbul: Nobel, 2022, pp. 29-47.
- [24] R. Robinson, Y. M. Wu, and S. F. Lin, "The protein tyrosine kinase family of the human genome," *Oncogene*, vol. 19, no. 49, pp. 5548-5557, 2000. doi: 10.1038/sj.onc.1204082
- [25] F. Inizan, M. Hanna, M. Stolyarchuk, I. Chauvot de Beauchêne, and L. Tchertanov, "The first 3D model of the full-length KIT cytoplasmic domain reveals a new look for an old receptor," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 5401, 2020. doi: 10.1038/s41598-020-62352-2
- [26] P. Besmer, J. Murphy, P. George, *et al.*, "A new acute transforming feline retrovirus and relationship of its oncogene v-kit with the protein kinase gene family," *Nature*, vol. 320, pp. 415-421, 1986. doi: 10.1038/320415a0
- [27] D. Mol, D. R. Dougan, T. R. Schneider, R. J. Skene, M. L. Kraus, D. N. Scheibe, *et al.*, "Structural basis for the autoinhibition and STI-571 inhibition of c-Kit tyrosine kinase," *J. Biol. Chem.*, vol. 279, no. 30, pp. 31655-31663, 2004. doi: 10.2210/pdb1t46/pdb
- [28] Sheikh, T. Tran, S. Vranic, A. Levy, and R. D. Bonfil, "Role and significance of c-KIT receptor tyrosine kinase in cancer: A review," *Bosn. J. Basic Med. Sci.*, vol. 22, no. 5, p. 683, 2022. doi: 10.17305/bjbms.2022.7185
- [29] J. Lennartsson and L. Rönnstrand, "Stem cell factor receptor/c-Kit: From basic science to clinical implications," *Physiol. Rev.*, vol. 92, no. 4, pp. 1619-1649, 2012. doi: 10.1152/physrev.00046.2011
- [30] M. Abbaspour Babaei, B. Kamalidehghan, M. Saleem, H. Z. Huri, and F. Ahmadipour, "Receptor tyrosine kinase (c-Kit) inhibitors: A potential therapeutic target in cancer cells," *Drug Des. Devel. Ther.*, vol. 10, pp. 2443-2459, 2016. doi: 10.2147/DDDT.S106527
- [31] J. A. Curtin, K. Busam, D. Pinkel, and B. C. Bastian, "Somatic activation of KIT in distinct subtypes of melanoma," *J. Clin. Oncol.*, vol. 24, no. 26, pp. 4340-4346, 2006. doi: 10.1200/JCO.2005.03.9199
- [32] A. Beghini, C. B. Ripamonti, R. Cairoli, G. Cazzaniga, P. Colapietro, F. Elice, *et al.*, "KIT activating mutations: Incidence in adult and pediatric acute myeloid leukemia, and identification of an internal tandem duplication," *Haematologica*, vol. 89, no. 8, pp. 920-925, 2004. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15339674>
- [33] D. Malvy, A. K. McElroy, H. de Clerck, S. Günther, and J. van Griensven, "Ebola virus disease," *Lancet*, vol. 393, no. 10174, pp. 936-948, 2019. doi: 10.1016/S0140-6736(18)33132-5
- [34] T. Q. Lo, B. J. Marston, B. A. Dahl, and K. M. De Cock, "Ebola: Anatomy of an epidemic," *Annu. Rev. Med.*, vol. 68, no. 1, pp. 359-370, 2017. doi: 10.1146/annurev-med-050715-105505
- [35] T. Garske, A. Cori, A. Ariyaratnam, I. M. Blake, I. Dorigatti, T. Eckmanns, *et al.*, "Heterogeneities in the case fatality ratio in the West African Ebola outbreak 2013-2016," *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, vol. 372, no. 1721, p. 20160308, 2017. doi: 10.1098/rstb.2016.0308
- [36] S. Baize, D. Pannetier, L. Oestereich, T. Rieger, L. Koivogui, N. Magassouba, *et al.*, "Emergence of Zaire Ebola virus disease in Guinea," *N. Engl. J. Med.*, vol. 371, no. 15, pp. 1418-1425, 2014. doi: 10.1056/NEJMoa1404505
- [37] H. Feldmann and T. W. Geisbert, "Ebola hemorrhagic fever," *Lancet*, vol. 377, no. 9768, pp. 849-862, 2011. doi: 10.1016/S0140-6736(10)60667-8

- [38] Almeida-Pinto, R. Pinto, and J. Rocha, "Navigating the complex landscape of Ebola infection treatment: A review of emerging pharmacological approaches," *Infect. Dis. Ther.*, vol. 13, pp. 21-55, 2024. doi: 10.1007/s40121-023-00913-y
- [39] M. U. Mirza, M. Vanmeert, A. Ali, K. Iman, M. Froeyen, and M. Idrees, "Perspectives towards antiviral drug discovery against Ebola virus," *J. Med. Virol.*, vol. 91, no. 12, pp. 2029-2048, 2019. doi: 10.1002/jmv.25357
- [40] U. Saray and U. Cavdar, "Investigating the role of artificial intelligence in the diagnosis and treatment of Alzheimer's disease," in *VIII International Scientific and Vocational Studies Congress (BILMES 2023)*, Turkey, Dec. 2023, pp. 132-137.
- [41] Vecchio, L. Sorrentino, A. Paoletti, R. Marra, and M. Arbitrio, "The state of the art on acetylcholinesterase inhibitors in the treatment of Alzheimer's disease," *J. Cent. Nerv. Syst. Dis.*, vol. 13, 11795735211029113, 2021. doi: 10.1177/11795735211029113
- [42] C. P. Ferri, M. Prince, C. Brayne, H. Brodaty, L. Fratiglioni, M. Ganguli, *et al.*, "Global prevalence of dementia: a Delphi consensus study," *Lancet*, vol. 366, no. 9503, pp. 2112-2117, 2005. doi: 10.1016/S0140-6736(05)67889-0
- [43] E. Bomasang-Layno and R. Bronsther, "Diagnosis and treatment of Alzheimer's disease: An update," *Delaware J. Public Health*, vol. 7, no. 4, pp. 74-85, 2021. doi: 10.32481/djph.2021.09.009
- [44] Hampel, M. M. Mesulam, A. C. Cuello, A. S. Khachaturian, A. Vergallo, M. R. Farlow, *et al.*, "Revisiting the Cholinergic Hypothesis in Alzheimer's Disease: Emerging Evidence from Translational and Clinical Research," *J. Prev. Alzheimers Dis.*, vol. 6, no. 1, pp. 2-15, 2019. doi: 10.14283/jpad.2018.43
- [45] B. Ul Islam and S. Tabrez, "Management of Alzheimer's disease-An insight into enzymatic and other novel potential targets," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 97, pp. 700-709, 2017. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.12.074
- [46] S. López, J. Bastida, F. Viladomat, and C. Codina, "Acetylcholinesterase inhibitory activity of some Amaryllidaceae alkaloids and Narcissus extracts," *Life Sci.*, vol. 71, no. 21, pp. 2521-2529, 2002. doi: 10.1016/S0024-3205(02)02034-9
- [47] V. F. Echenique, G. Alvarez-Rivera, V. M. A. Luna, A. F. V. da Cruz Antonio, M. R. Mazalli, E. Ibañez, *et al.*, "Pressurized liquid extraction with ethanol in an intermittent process for rice bran oil: Evaluation of process variables on the content of β -sitosterol and phenolic compounds, antioxidant capacity, acetylcholinesterase inhibitory activity, and oil quality," *LWT – Food Sci. Technol.*, vol. 207, p. 116650, 2024. doi: 10.1016/j.lwt.2023.116650
- [48] C. Kazak, M. Aygün, G. Turgut Cin, M. Odabaşoğlu, S. Özbey, and O. Büyükgüngör, "2-[(4-Hydroxyphenyl)iminomethyl]thiophene," *Acta Crystallogr. Sect. C Struct. Chem.*, vol. 56, pt. 8, pp. 1044-1045, 2000. doi: 10.1107/S0108270100007770
- [49] C. A. Lane, J. Hardy, and J. M. Schott, "Alzheimer's disease," *Eur. J. Neurol.*, vol. 25, no. 1, pp. 59-70, 2018. doi: 10.1111/ene.13439
- [50] Ali, A. Haque, K. Saleem, and M.-F. Hsieh, "Schiff bases: An emerging class of therapeutic agents," *Curr. Org. Chem.*, vol. 20, no. 8, pp. 1-13, 2016. doi: 10.2174/1385272820666151123150433
- [51] A. Tiwari, V. Gupta, and A. Kushwah, "In silico and in vitro anti-Alzheimer potential of Schiff base derivatives," *Med. Chem. Res.*, vol. 29, no. 5, pp. 813-822, 2020. doi: 10.1007/s00044-020-02551-y
- [52] Matsuno, A. Marzi, and H. Feldmann, "Ebola virus entry: From molecular characterization to drug discovery," *Trends Microbiol.*, vol. 27, no. 7, pp. 593-604, 2019. doi: 10.1016/j.tim.2019.02.005
- [53] S. M. Gomha, S. M. Riyadh, S. A. Alharbi, and M. M. Elaasser, "Synthesis and antiviral evaluation of new Schiff base derivatives against hepatitis A and Ebola viruses," *Arch. Pharm.*, vol. 355, no. 8, p. e2100509, 2022. doi: 10.1002/ardp.202100509
- [54] Gaussian 03, Gaussian, Inc., Wallingford, CT, 2004. [Online]. Available: <https://gaussian.com/>
- [55] P. J. Stephens, F. J. Devlin, C. F. Chabalowski, and M. J. Frisch, "Ab initio calculation of vibrational absorption and circular dichroism spectra using density functional force fields," *J. Phys. Chem.*, vol. 98, no. 45, pp. 11623-11627, 1994. doi: 10.1021/j100096a001
- [56] A. D. Becke, "Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange," *J. Chem. Phys.*, vol. 98, no. 7, pp. 5648-5652, 1993. doi: 10.1063/1.464913
- [57] C. Lee, W. Yang, and R. G. Parr, "Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density," *Phys. Rev. B*, vol. 37, no. 2, pp. 785-789, 1988. doi: 10.1103/PhysRevB.37.785
- [58] G. A. Petersson and M. A. Al-Laham, "A complete basis set model chemistry. II. Open-shell systems and the total energies of the first-row atoms," *J. Chem. Phys.*, vol. 94, no. 9, pp. 6081-6090, 1991. doi: 10.1063/1.460447
- [59] J. Frisch, A. B. Nielsen, and A. J. Holder, *GaussView user manual*. Gaussian Inc., 2001.
- [60] J. Turner, J. J. McKinnon, S. K. Wolff, D. J. Grimwood, P. R. Spackman, D. Jayatilaka, and M. A. Spackman, "CrystalExplorer17 [Computer software]," Univ. Western Australia, 2017.
- [61] F. L. Hirshfeld, "Bonded-atom fragments for describing molecular charge densities," *Theor. Chim. Acta*, vol. 44, no. 2, pp. 129-138, 1977. doi: 10.1007/BF00549096
- [62] A. Spackman and D. Jayatilaka, "Hirshfeld surface analysis," *CrystEngComm*, vol. 11, no. 1, pp. 19-32, 2009. doi: 10.1039/B818330A
- [63] J. McKinnon, D. Jayatilaka, and M. A. Spackman, "Towards quantitative analysis of intermolecular interactions with Hirshfeld surfaces," *Chem. Commun.*, no. 37, pp. 3814-3816, 2007. doi: 10.1039/B704980C
- [64] C. S. Brown, M. S. Lee, D. W. Leung, T. Wang, W. Xu, P. Luthra, *et al.*, "In silico derived small molecules bind the filovirus VP35 protein and inhibit its polymerase cofactor activity," *J. Mol. Biol.*, vol. 426, no. 10, pp. 2045-2058, 2014. doi: 10.1016/j.jmb.2014.01.010

- [65] A. P. Garner, J. M. Gozgit, R. Anjum, S. Vodala, A. Schrock, T. Zhou, *et al.*, "Ponatinib inhibits polyclonal drug-resistant KIT oncoproteins and shows therapeutic potential in heavily pretreated gastrointestinal stromal tumor (GIST) patients," *Clin. Cancer Res.*, vol. 20, no. 22, pp. 5745-5755, 2014. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-14-1397
- [66] C. Bartolucci, E. Perola, C. Pilger, G. Fels, and D. Lamba, "Three-dimensional structure of a complex of galanthamine (Nivalin) with acetylcholinesterase from *Torpedo californica*: Implications for the design of new anti-Alzheimer drugs," *Proteins Struct. Funct. Bioinform.*, vol. 42, no. 2, pp. 182-191, 2001. doi: 10.1002/1097-0134(20010201)42:2<182:AID-PROT1012>3.0.CO;2-7
- [67] Trott and A. J. Olson, "AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading," *J. Comput. Chem.*, vol. 31, no. 2, pp. 455-461, 2010. doi: 10.1002/jcc.21334
- [68] Dassault Systèmes BIOVIA, *Discovery Studio Visualizer*, Version 2017, San Diego, CA, USA, 2017.
- [69] A. Daina, O. Michielin, and V. Zoete, "SwissADME: A free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness, and medicinal chemistry friendliness of small molecules," *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 42717, 2017. doi: 10.1038/srep42717
- [70] M. H. Islam and M. A. Hannan, "Schiff bases: Contemporary synthesis, properties, and applications," IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.114850
- [71] Huang, Z. Zeng, and Q. Huang, "The crystal structure of (*E*)-2-methoxy-6-(((5-methyl-1,3,4-thiadiazol-2-yl)imino)methyl)phenol, C₁₁H₁₁N₃O₂S," *Zeitschrift für Kristallographie - New Crystal Structures*, vol. 239, no. 1, pp. 51-52, 2024. doi: 10.1515/ncrs-2023-0135
- [72] A. Özek Yıldırım, M. Gülsu, and Ç. Albayrak Kaştaş, "Synthesis, crystal structure, and computational studies of a new Schiff base compound: (*E*)-4-bromo-2-ethoxy-6-[[2-methoxyphenyl]imino]methyl}phenol," *Structure Reports*, vol. 74, no. 3, pp. 319-322, 2018. doi: 10.1107/S2056989018002062
- [73] H. H. Tang, L. Zhang, L. L. Zeng, X. M. Fang, L. R. Lin, and H. Zhang, "A pair of Schiff base enantiomers studied by absorption, fluorescence, electronic and vibrational circular dichroism spectroscopies and density functional theory calculation," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 46, pp. 36813-36819, 2015. doi: 10.1039/C5RA04885A
- [74] Fukui, "Role of frontier orbitals in chemical reactions," *Science*, vol. 218, no. 4574, pp. 747-754, 1982. doi: 10.1126/science.218.4574.747
- [75] G. Parr and W. Yang, *Density-functional theory of atoms and molecules*. Oxford University Press, 1989.
- [76] P. K. Chattaraj, U. Sarkar, and D. R. Roy, "Electrophilicity index," *Chem. Rev.*, vol. 106, no. 6, pp. 2065-2091, 2006. doi: 10.1021/cr040109f
- [77] Y. Zhang, G. Lu, J. Li, Y. Wang, and G. Yang, "Study on the electronic and optical properties of organic dye sensitizers using DFT and TD-DFT," *J. Mol. Struct.*, vol. 1015, pp. 77-84, 2012. doi: 10.1016/j.molstruc.2011.12.048
- [78] A. P. de Silva, H. Q. N. Gunaratne, and C. P. McCoy, "A molecular photoionic AND gate based on fluorescent signaling," *Nature*, vol. 364, no. 6434, pp. 42-44, 1993. doi: 10.1038/364042a0
- [79] P. Politzer and J. S. Murray, "The fundamental nature and role of the electrostatic potential in atoms and molecules," *Theor. Chem. Acc.*, vol. 108, pp. 134-142, 2002. doi: 10.1007/s00214-002-0363-9
- [80] C. H. Suresh, V. Krishnakumar, G. Sudhakar, and R. Aravind, "Molecular electrostatic potential analysis: A powerful tool to predict chemical reactivity and non-covalent interactions in molecules," *J. Mol. Struct.*, vol. 1250, p. 131705, 2022. doi: 10.1016/j.molstruc.2021.131705
- [81] A. D. MacKerell, "Empirical force fields for biological macromolecules: Overview and issues," *J. Comput. Chem.*, vol. 25, no. 13, pp. 1584-1604, 2004. doi: 10.1002/jcc.20082
- [82] P. Bouanich and A. Predoi-Cross, "Theoretical calculations for line-broadening and pressure-shifting in the fundamental and first two overtone bands of CO-H₂," *J. Mol. Struct.*, vol. 742, no. 1-3, pp. 183-190, 2005. doi: 10.1016/j.molstruc.2005.01.004
- [83] A. Bosshard, M. Bösch, I. Liakatas, M. Jäger, and P. Günter, "Second-order nonlinear optical organic materials: Recent developments," in *Nonlinear Optical Effects and Materials*, Springer, 2000, pp. 163-299.
- [84] P. P. Kuzhir *et al.*, "Onion-like carbon based polymer composite films in microwaves," *Solid State Sci.*, vol. 11, no. 10, pp. 1762-1767, 2009. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2008.12.003
- [85] A. E. Reed, L. A. Curtiss, and F. Weinhold, "Intermolecular interactions from a natural bond orbital, donor-acceptor viewpoint," *Chem. Rev.*, vol. 88, no. 6, pp. 899-926, 1988. doi: 10.1021/cr00088a005
- [86] F. Jensen, *Introduction to Computational Chemistry*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2017.
- [87] C. Ravikumar, I. H. Joe, and V. S. Jayakumar, "Charge transfer interactions and nonlinear optical properties of push-pull chromophore benzaldehyde phenylhydrazones: A vibrational approach," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 460, no. 4-6, pp. 552-558, 2008. doi: 10.1016/j.cplett.2008.06.042
- [88] F. Weinhold, *Discovering Chemistry with Natural Bond Orbitals*. John Wiley & Sons, 2012.
- [89] S. Mulliken, "Criteria for the construction of good self-consistent-field molecular orbital wave functions, and the significance of LCAO-MO population analysis," *J. Chem. Phys.*, vol. 36, no. 12, pp. 3428-3439, 1962. doi: 10.1063/1.1732745
- [90] Ş. Çakmak, B. Koşar Kırca, A. Veyisoğlu, H. Yakan, C. C. Ersanlı, ve H. Kütük, "Experimental and theoretical investigations on a furan-2-carboxamide-bearing thiazole: Synthesis, molecular characterization by IR/NMR/XRD, electronic characterization by DFT, Hirshfeld surface analysis and biological activity," *Crystal Structure Communications*, vol. 78, no. 3, pp. 201-211, 2022. doi: 10.1107/S2053229622001776
- [91] Shyamapada, M. Christoph, ve S. Mitra, "Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials," *Acta Crystallogr. Sect. B*, vol. 63, pp. 129-137, 2016. doi: 10.1107/S0108768109008780

- [92] Başak, Antitumor and anticarcinogenic activity of some Schiff base molecules studied by molecular docking, Master's Thesis, Sinop University, Graduate Education Institute, 2023.
- [93] Anwar, P. Kumar, ve A. U. Khan, "Modern tools and techniques in computer-aided drug design," M. S. Koumar, Ed., *Molecular docking for computer-aided drug design*, Academic Press, pp. 1-22, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-823549-6.00001-2
- [94] X.-Y. Meng, H.-X. Zhang, M. Mezei, ve M. Cui, "Molecular docking: A powerful approach for structure-based drug discovery," *Curr. Comput.-Aided Drug Des.*, 2012. doi: 10.2174/157340911795677602
- [95] G. Ferreira, R. N. dos Santos, G. Oliva, ve A. D. Andricopulo, "Molecular docking and structure-based drug design strategies," *Molecules*, vol. 20, no. 7, pp. 13384-13421, 2015. doi: 10.3390/molecules200713384
- [96] Pinzi ve G. Rastelli, "Molecular docking: Shifting paradigms in drug discovery," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 20, no. 18, p. 4331, 2019. doi: 10.3390/ijms20184331
- [97] B. Banaganapalli, F. A. Morad, M. Khan, C. S. Kumar, R. Elango, Z. Awan, ve N. A. Shaik, "Molecular docking," in *Essentials of Bioinformatics, Volume I: Understanding Bioinformatics: Genes to Proteins*, pp. 335-353, 2019.
- [98] A. J. Owoloye, F. C. Ligali, O. A. Enejoh, A. Z. Musa, O. Aina, E. T. Idowu, ve K. M. Oyebola, "Molecular docking, simulation, and binding free energy analysis of small molecules as Pf HT1 inhibitors," *PloS One*, vol. 17, no. 8, p. e0268269, 2022. doi: 10.1371/journal.pone.0268269
- [99] D. F. McGinnity, J. Collington, R. P. Austin, ve R. J. Riley, "Evaluation of human pharmacokinetics, therapeutic dose and exposure predictions using marketed oral drugs," *Curr. Drug Metab.*, vol. 8, no. 5, pp. 463-479, 2007. doi: 10.2174/138920007782151895
- [100] P. M. Gleeson, A. Hersey, ve S. Hannongbua, "In silico ADME models: A general assessment of their utility in drug discovery applications," *Curr. Top. Med. Chem.*, vol. 11, no. 4, pp. 358-381, 2011. doi: 10.2174/156802611794863691
- [101] S. G. Summerfield, A. J. Stevens, L. Cutler, M. del Carmen Osuna, B. Hammond, S. P. Tang, A. Hersey, D. J. Spalding, ve P. Jeffrey, "Improving the in vitro prediction of in vivo central nervous system penetration: Integrating permeability, P-glycoprotein efflux, and free fractions in blood and brain," *J. Pharmacol. Exp. Ther.*, vol. 316, no. 3, pp. 1282-1290, 2006. doi: 10.1124/jpet.105.092916
- [102] P. F. Hollenberg, U. M. Kent, ve N. N. Bumpus, "Mechanism-based inactivation of human cytochromes P450s: Experimental characterization, reactive intermediates, and clinical implications," *Chem. Res. Toxicol.*, vol. 21, no. 1, pp. 189-205, 2008. doi: 10.1021/tx700282x
- [103] P. Gleeson, "Generation of a set of simple, interpretable ADMET rules of thumb," *J. Med. Chem.*, vol. 51, no. 4, pp. 817-834, 2008. doi: 10.1021/jm701198b
- [104] J. D. Hughes et al., "Physiochemical drug properties associated with in vivo toxicological outcomes," *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, vol. 18, pp. 4872-4875, 2008. doi: 10.1016/j.bmcl.2008.07.071
- [105] J. A. Arnott ve S. L. Planey, "The influence of lipophilicity in drug discovery and design," *Expert Opin. Drug Discov.*, vol. 7, no. 10, pp. 863-875, 2012. doi: 10.1517/17460441.2012.714363
- [106] H. van De Waterbeemd, D. A. Smith, K. Beaumont, ve D. K. Walker, "Property-based design: optimization of drug absorption and pharmacokinetics," *J. Med. Chem.*, vol. 44, no. 9, pp. 1313-1333, 2001. doi: 10.1021/jm000407e
- [107] C. A. Lipinski, F. Lombardo, B. W. Dominy, ve P. J. Feeney, "Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 46, no. 1-3, pp. 3-26, 2001. doi: 10.1016/S0169-409X(00)00129-0
- [108] L. Di, E. H. Kerns, ve G. T. Carter, "Drug-like property concepts in pharmaceutical design," *Curr. Pharm. Des.*, vol. 15, no. 19, pp. 2184-2194, 2009. doi: 10.2174/138161209788682479

MPPT Method Supported by Particle Swarm Optimization for Increasing Power Efficiency in Solar Energy Systems

Nazlıcan Güvenç^a, Abdil Karakan^{b,1}, Yüksel Oğuz^c

^a Afyon Kocatepe University, Institute of Science, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye
ORCID ID: 0009-0008-1370-3940

^b Afyon Kocatepe University, Dazkırı Vocational School, Department of Electrical, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye
ORCID ID: 0000-0003-1651-7568

^c Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-5233-151X

Abstract

With the increasing global interest in renewable energy sources, enhancing the power generation capacity of photovoltaic (PV) systems has become a critical research focus. Due to the continuously changing environmental conditions such as solar irradiance and temperature accurate and real-time tracking of the Maximum Power Point (MPP) is essential for efficient energy conversion. In this study, a Particle Swarm Optimization (PSO)-based approach is proposed to improve the accuracy and response speed of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) process. Compared to conventional MPPT algorithms, the proposed method demonstrates more stable performance and significantly enhances the overall energy efficiency of the system. Simulation results show that the PSO-assisted MPPT algorithm provides rapid response under transient conditions and exhibits reduced oscillations in steady-state operation. Accordingly, the proposed method offers an effective and reliable solution for real-time implementation in photovoltaic systems.

Keywords: “Particle swarm optimization, maximum power point tracking, photovoltaic systems, renewable energy, energy efficiency.”

1. Introduction

Today, the demand for energy is constantly increasing with the increase in industrialization, the acceleration of urbanization processes and the rise in living standards. The fact that traditional energy sources based on fossil fuels are limited, create environmental pollution and cause global problems such as climate change has made it necessary to turn to sustainable and environmentally friendly energy sources. In this context, renewable energy sources, especially solar energy, are gaining more and more importance worldwide and are a priority in the energy strategies of many countries. Solar energy stands out with its advantages such as having a wide potential, being able to be directly converted into electrical energy and not harming the environment [1-3]. PV systems play a key role in this conversion process as systems that directly convert solar energy into electrical energy. However, the efficiency of PV panels varies depending on environmental conditions such as solar radiation, ambient temperature and shading, and this directly affects the amount of power the system can produce. For this reason, in order for photovoltaic systems to operate efficiently, it is of great importance to correctly determine the most suitable operating point at any time, MPN, and to ensure that the system operates at this point. [4]. MPPT algorithms cover various methods developed to increase the efficiency of photovoltaic systems and minimize power losses. Among traditional MPPT algorithms, methods such as P&O and Incremental Conductance (INC) are widely used. However, these methods have some disadvantages, such as slow response, oscillation or getting stuck in local maxima, especially in sudden environmental changes. In order to overcome these limitations, the use of methods based on artificial intelligence and heuristic optimization techniques has increased in recent years. In this context, PSO has become a remarkable method in MPPT applications with its high search capability, fast convergence feature and simple structure [5,6].

PSO is an optimization technique that is based on swarm behavior in natural systems and searches for the best solution by evaluating many solution candidates simultaneously. The application of this algorithm to photovoltaic systems allows reaching MPN faster and more decisively, thus increasing system efficiency significantly. In this study, a PSO-based approach has been developed to perform maximum power point tracking in photovoltaic systems and the effects of this method on the system have

¹ Corresponding Author
E-mail Address: akarakan@aku.edu.tr

been analyzed in detail. The results obtained show that the PSO-supported MPPT method provides more successful results compared to classical methods [7]. In this context, the main purpose of the study is to develop an MPPT algorithm based on particle swarm optimization to increase energy efficiency in solar energy systems and to demonstrate the effectiveness of the method through numerical analysis and simulations. With this contribution, both more effective use of renewable energy systems is provided and an important step is taken towards sustainability in the field of energy [8,9].

2. Literature

MPPT methods developed to increase power efficiency in PV systems are among the important technological solutions that directly affect the efficiency of energy conversion. In this context, different algorithms have been developed in the literature and comparative studies have been carried out. P&O and INC, among the classical MPPT methods, have found widespread use with their simple structures and low computational loads [10-12]. However, these methods face performance problems such as insufficient response time and power oscillations, especially in sudden radiation changes [13-14]. In order to overcome these limitations, the tendency towards artificial intelligence and heuristic optimization techniques has increased. PSO in particular, has become a frequently preferred method in the MPPT field. PSO developed by Kennedy and Eberhart, provides strong control in the search for optimum solutions by imitating swarm behavior [15].

The applications of PSO algorithm in PV were first modeled in detail by Rakhmatov et al. [16]. In this study, a comparative analysis of the PSO algorithm with classical MPPT methods, especially P&O and INC, was performed; it was shown that the algorithm reaches the MPPT faster and more accurately even under variable environmental conditions. The researchers emphasized that PSO can detect the global optimum value within the multiple solution space with a high success rate and that this feature reduces the risk of being trapped in local maxima. In addition, it was shown that PSO responds faster to sudden changes in external parameters such as radiation and temperature thanks to its adaptive structure, thus minimizing the fluctuations in power production. Similarly, in a comprehensive comparative analysis conducted by Esham and Chapman, it was shown that the PSO algorithm produces much less power oscillation than classical methods, especially under stable operating conditions, and its tracking accuracy is high [17]. The researchers stated that thanks to the particle-based search mechanism of PSO, it can precisely detect the maximum point on the characteristic curve of the PV system, and this feature directly increases the system efficiency. In their study, performance criteria such as convergence time, degree of stability and computational complexity of the algorithm were also addressed, and it was stated that they proved the applicability of PSO in these respects. These results are accepted as an important turning point in the literature in terms of showing that PSO can be an alternative to traditional methods not only in theory but also in real-time applications. Gaafar et al., in their study where they analyzed the effectiveness of the PSO algorithm in photovoltaic systems under different weather conditions, drew attention to the high adaptability of this algorithm to environmental variables [18]. In the study, the real-time MPPT performance of PSO was evaluated, considering the effects of sudden changes in solar radiation and ambient temperature on PV system performance. The obtained results revealed that classical algorithms can produce erroneous MPPT results in the face of temporary cloudiness, shading or temperature fluctuations; It has been shown that PSO can maintain system efficiency by acting more flexibly and adaptively against such environmental variables. This environmental tolerance capability of PSO offers a strategic advantage especially for solar energy systems established in regions with variable climate conditions. On the other hand, studies on hybrid MPPT algorithms, not only based on PSO, have also increased significantly in the literature. In this context, Kumari and Babu developed a new hybrid approach by combining the PSO algorithm with the INC method [19]. The method aims to integrate the fast start and low computational complexity advantages of the INC algorithm with the high tracking accuracy and oscillation-free power tracking ability of PSO. In the research, the developed hybrid algorithm was tested in different scenarios and the results showed that the maximum power point was reached with a more stable output power, shorter tracking time and less energy loss compared to classical methods. In addition, the system exhibited a more stable reaction to temporary shadowing and radiation irregularities, significantly increasing the MPPT performance especially in difficult environmental conditions. This study has been one of the pioneering examples proving that hybrid algorithms can provide more effective and reliable MPPT solutions by combining the strengths of traditional methods with heuristic optimization techniques.

Kumar and Manoharan increased MPPT accuracy in PV to over 98% with the hybrid PSO-fuzzy algorithm they developed [20]. This hybrid method provided higher accuracy and system stability by combining PSO and fuzzy logic methods. In particular, under variable environmental conditions, a more stable and precise MPPT tracking process was presented by combining the optimization power of PSO with the flexibility of fuzzy logic. This study revealed that PSO outperformed traditional MPPT algorithms and that the efficiency of these algorithms could be further increased with hybrid structures. Similarly, some researchers emphasized the superior performance of PSO in low irradiance conditions. Sera and Teodorescu stated that PSO has advantages over traditional methods, especially at low irradiance levels [21]. This study highlights the high accuracy and fast tracking capabilities provided by PSO to minimize the negative effects of low irradiance on the efficiency of PV systems. PSO can reach the maximum power point faster and more accurately compared to traditional P&O and INC methods, thus providing more efficient energy production even under low irradiance conditions. Abdelsalam et al. analyzed the effects of PSO on the processing time and showed that the integration of the algorithm with digital control systems is possible [22]. The computational load of PSO can be an important factor when used in control systems. However, the study concluded that optimizing the processing time of PSO and ensuring its integration with digital control units allows to increase the efficiency

in real-time applications. This study proves that the high computational power requirements of PSO can be minimized with appropriate digital control structures and thus it can be used effectively in PV systems. Benhmed et al. tested the ability of PSO to separate the global maximum from the local maximum [23]. In the study, the ability of PSO to find the global optimum correctly by eliminating the problem of getting stuck in local optimums encountered in photovoltaic systems was carefully examined. The results show that PSO can detect the global maximum quickly and precisely, thus contributing to the long-term operation of PV systems with higher efficiency. This feature is of great importance especially in complex systems and scenarios where environmental conditions are variable. In addition, Nacer et al. demonstrated the success of PSO in real-time hardware implementations by testing them on FPGA platforms [24]. In the study, it was shown that the PSO algorithm works efficiently on FPGA platforms and that the calculations required for MPPT tracking can be performed quickly. This study demonstrated how PSO can be used as an effective optimization tool in hardware-based applications, especially in situations requiring high speed and low latency.

Liserre et al. suggested that PSO provides efficiency increase in high power PV [25]. In this study, the performance of PSO in high power applications was investigated in detail and the results showed that PSO provides more stable and efficient operation by minimizing power losses. Especially in large-scale PV systems, the high accuracy and low oscillation provided by PSO increase energy efficiency in the long term and strengthen the reliability of the system. Femia et al. reported that system stability was significantly improved in boost converters controlled by PSO [26]. In this study, it was shown that PSO provides more stable energy production by optimizing the power output of the system and increases the stability of the system. It was emphasized that PSO stabilizes the system performance by increasing the resilience of PV systems, especially against sudden load changes and external effects. Boukenoui et al. emphasized that PSO is also an effective optimization tool in hybrid systems [27]. In the study, they analyzed the performance of PSO not only in photovoltaic systems but also in PV-wind hybrid energy systems. The results showed that PSO increases the energy production capacity in hybrid systems, optimizes the overall efficiency of the system and provides the maximum benefit from the combination of two different energy sources. Among the new approaches, Jena et al. significantly reduced the monitoring time by developing adaptive PSO algorithms [28]. This innovative algorithm optimized the monitoring time and the response time of the system, allowing PSO to adapt faster to environmental changes. Lian et al. studied the effect of the number of particles and learning coefficients on the MPPT success and stated that the correct adjustment of these parameters greatly improved the performance of the algorithm [29]. Rezk and Eltamaly increased the prediction success in PV systems by integrating the PSO algorithm with an ANN [30]. This hybrid method provided more accurate predictions of solar radiation and other environmental factors, allowing the PV system to operate more efficiently.

The performance of PSO-based MPPT depends heavily on key parameters such as inertia weight, cognitive/social coefficients, and swarm size. Several studies highlight the importance of selecting these values carefully to balance convergence speed and steady-state stability [10,11]. However, most existing works rely on fixed parameter sets and focus on irradiance variation, with limited attention given to temperature sweeps at constant irradiance. Additionally, few implementations explore the behavior of low-particle-count PSO systems.

3. Materials and Methods

In this study, Particle Swarm Optimization algorithm is used as a basis for the maximum power point tracking problem of photovoltaic systems. PSO algorithm is among the evolutionary optimization techniques and aims to reach the optimum solution by performing an iterative search in the solution space with a large number of solution candidates. The algorithm represents each solution candidate as a particle and the positions and velocities of these particles are updated by being affected by both their own experiences and the experiences of other particles in the swarm. The PV system model used in the study was developed in MATLAB/Simulink environment. In this model, the electrical characteristics of the PV panels are modeled as a function of environmental parameters such as radiation and temperature. In the model, MPPT control is provided using the PSO algorithm and the performance of the algorithm is evaluated under different operating conditions. Simulations were performed under different irradiance levels (200 W/m^2 - 1000 W/m^2) and temperature values (0°C - 75°C) to analyze the effectiveness of the PSO-based MPPT method in dynamic environmental conditions. Performance evaluation was made on the power output, convergence speed and stability criteria of the system. Figure 1 shows the general working principle of the system.

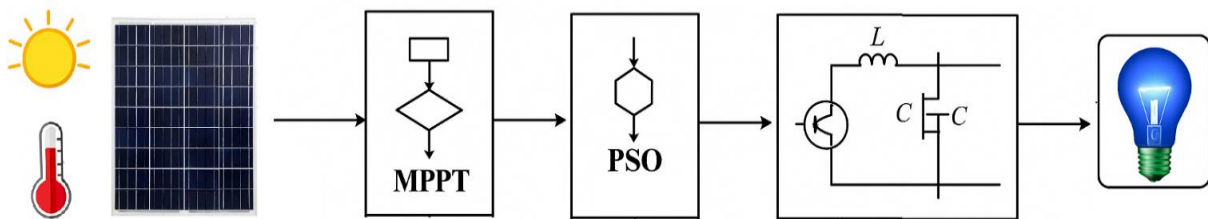


Fig. 1. General working principle of the system

3.1. Fundamentals of PSO Algorithm

PSO is an evolutionary optimization algorithm and simulates the solution search process inspired by biological systems in nature. This algorithm tries to find the best solution by navigating a search space with a large number of solution candidates. It was developed by James Kennedy and Russell Eberhart in 1995. The basic principle of PSO is that a group of individuals share information and benefit from each other's movements to effectively navigate the solution space and reach the optimal solution. This method works by modeling swarm behavior and constantly updating the positions of each individual in the solution space by considering their own best solution and the group's best solution. In the PSO algorithm, each particle represents a point in the solution space. These points contain vectors of parameters in the problem that need to be optimized. The positions and velocities of the particles are updated with certain iterations. The velocity update formula allows each particle to calculate a new velocity by referencing its own past best position and the best position in the swarm. As particles update their velocities, they move more efficiently in the solution space. One of the key components of PSO is that particles obtain new velocities using a random component. This randomness helps the algorithm to scan more widely to a point closer to the global optimum solution. There are two main components to PSO's velocity update formula. The first is each particle's desire to get closer to its personal best solution. This means that the particle tries to improve its own past best solution. The second is the desire to get closer to the best solution of other particles. This component allows all particles in the swarm to benefit from each other's experiences in searching for the best solution. These two components strengthen PSO's collective learning ability. In addition, in PSO, each particle can make a wider search in the solution space at each iteration, benefiting not only from its own personal experience but also from the experiences of other particles.

One of the biggest advantages of the PSO algorithm is that it can avoid local minima in the solution space. This is a problem that is often encountered in other optimization algorithms, but PSO has a high success rate in reaching the global optimum. In each iteration, particles update their velocities and move in different directions in the solution space, thus avoiding local optima and searching in a wider area. This feature makes PSO an effective algorithm, especially in complex problems with many local optima. However, PSO also has some limitations. The algorithm is very sensitive to the correct setting of parameters. Incorrect selection of these parameters can seriously affect the performance of the algorithm. For example, a too high velocity coefficient can cause particles to scan the solution space too widely, thus slowing down convergence. On the other hand, low speed coefficients may cause them to get stuck in a narrow area of the solution space and produce less efficient results. The success of PSO largely depends on the appropriate tuning of these parameters and the rapid convergence of the algorithm.

Another important advantage of PSO is its flexibility in application. PSO can be easily adapted to many different optimization problems and generally has a simpler structure. Unlike other evolutionary algorithms, PSO parameter adjustments are generally less complex and allow the algorithm to be implemented quickly. In addition, PSO's parallel processing capability makes it possible to obtain high-efficiency results on large data sets. Therefore, PSO is successfully used in many applications in engineering and industry. PV are affected by factors such as environmental variables and solar radiation. Since the PSO algorithm has a high adaptability to such environmental factors, it is an extremely suitable method for MPPT of PV systems. PSO continuously optimizes the output power of solar panels to increase the efficiency of PV systems. Especially as environmental conditions such as radiation and temperature change, the PSO algorithm quickly adapts to these changes and finds the most efficient power point and maximizes the energy production capacity of the PV system. This is one of the main reasons for the success of PSO in photovoltaic systems and plays a critical role in achieving high performance in solar energy systems. The fast convergence feature of PSO enables photovoltaic systems to reach the maximum power point by tracking their power outputs quickly and accurately. Therefore, the PSO algorithm offers an effective solution for increasing the efficiency of solar energy systems. One of the most important advantages of PSO in photovoltaic systems is its ability to adapt to changes in environmental factors. Solar radiation and temperature have a significant effect on the efficiency of PV systems. Taking these environmental factors into account, PSO continuously optimizes the operating point of the PV system to achieve the best performance. In this process, the PSO algorithm helps to increase the efficiency of the system by shortening the tracking time and reducing energy loss. This feature makes PSO a very efficient MPPT method in solar energy systems.

The effectiveness of the PSO algorithm in MPPT applications is highly dependent on the appropriate selection of its parameters. These parameters, including inertia weight, acceleration coefficients (cognitive and social), swarm size, and maximum velocity, significantly influence the algorithm's convergence speed, the accuracy of the solution, and its stability. Therefore, a careful optimization of the PSO parameters is crucial to ensure the optimal performance of the proposed PSO-based MPPT method. In this study, a trial-and-error approach was employed to determine suitable values for the PSO parameters. This involved testing various combinations of parameter values within predefined ranges and evaluating the resulting MPPT performance. The optimization procedure consisted of defining parameter ranges based on literature and preliminary simulations, generating multiple combinations of parameter values within those ranges, conducting MPPT simulations for each combination under various operating conditions, assessing the performance using relevant metrics, and selecting the parameter combination that yielded the best overall performance. The optimization process resulted in the following parameter values for the PSO-based MPPT method: an inertia weight of 0.7, cognitive and social acceleration coefficients of 2.0, a swarm size of 30, and a maximum velocity set to 20% of the variable range. These values were found to provide a good balance between convergence speed, tracking accuracy, and stability of the MPPT system. A sensitivity analysis further revealed that the algorithm's convergence speed is most sensitive to variations in the inertia weight, while the acceleration coefficients primarily affect the stability of the MPPT operation, highlighting the importance of careful parameter selection for robust and reliable MPPT performance. While

the trial-and-error approach provided a practical means of identifying suitable parameter values, future work could explore more sophisticated optimization techniques, such as genetic algorithms or response surface methodology, to further refine the parameter optimization process and potentially achieve even better MPPT performance.

3.2. PV System Model

PV are devices that convert sunlight directly into electrical energy, and this conversion occurs through semiconductor materials. The basic component of PV systems is photovoltaic modules. A photovoltaic module consists of a large number of solar cells connected in series. Each cell absorbs sunlight and converts photons into electrons, and this electron flow produces an electric current. Since the main purpose of PV systems is to convert sunlight into electricity in the most efficient way, there are many factors that affect the performance of such systems. The most important of these factors are the level of radiation, temperature, and the electrical properties of the panel. Mathematical modeling of PV systems is important to accurately predict and optimize the performance of the system. The electrical properties of PV modules are usually described by a voltage-current (V-I) characteristic. This characteristic is necessary to determine the output power and maximum power point of the module. An ideal modeling of a PV module is usually represented as an electrical circuit, which includes the internal resistance, open circuit voltage, and short circuit current of a photovoltaic cell. The most commonly used model is a diode model, which simulates the nonlinear behavior of a PV cell. In this model, the output of the module is represented by a diode and a resistor, along with a current source determined by the direct effect of sunlight. In this way, the output power of the photovoltaic module can be calculated depending on the external environmental conditions and the structural characteristics of the module.

The efficiency of PV modules depends directly on solar radiation and environmental factors. Solar radiation is the intensity of solar energy reaching the earth's surface and is one of the most important parameters affecting the performance of PV systems. Solar radiation is usually expressed in W/m^2 and varies depending on the time of day, the period of the year and the weather conditions. Temperature is another important factor, as PV modules operate with lower efficiency at higher temperatures. As solar radiation increases, the output power of the module also increases, but as the temperature increases, the efficiency of the PV cell decreases. Therefore, the effect of environmental parameters such as radiation and temperature should be carefully considered in the design and modeling of PV systems. Energy production in PV systems is usually optimized by accurately tracking the MPP. PV modules produce different voltage and current values according to different radiation and temperature conditions. MPP is the point at which the module provides the highest energy efficiency under these conditions. However, since PV systems are affected by environmental factors, MPP must be constantly monitored. MPPT algorithms used for this purpose are of great importance to increase the efficiency of PV systems. Modern algorithms such as PSO are used to find this point quickly. PSO adapts quickly to changes in environmental factors and enables tracking of the maximum power point despite variables such as solar radiation and temperature. In this way, PV systems can operate at the highest efficiency under all conditions.

In modeling PV systems, mathematical and physical parameters must be used together to more accurately estimate the energy production efficiency of the system. Examining the relationship between solar radiation, temperature, electrical properties of the panel and environmental factors plays a critical role in understanding the performance of PV systems. In addition, correct orientation, placement and module configuration are important in the design of PV systems to minimize energy losses. In particular, advanced algorithms and methods are used for the optimization of PV systems in order to maximize the efficiency of each module and component. This optimization is based on the ability of the system to adapt to environmental conditions in order to ensure that it produces maximum power under all conditions. As a result, PV system modeling is a critical tool for increasing the efficiency of photovoltaic energy production. This modeling provides solutions to optimize the performance of the system by taking into account the effects of environmental factors such as radiation and temperature. In addition, advanced algorithms such as PSO continuously monitor the maximum power point of these systems, providing more efficient energy production. In this direction, the design and management of PV systems can be made more efficient with modern optimization techniques, thus maximizing the potential of solar energy.

3.3. PSO Application for MPPT

MPPT is a critical process to increase the efficiency of PV. PV modules produce voltage and current values that are constantly changing according to different environmental conditions, so it is necessary to always track the MPP, which is the highest energy production point. While traditional MPPT methods are generally based on fixed algorithms, large changes can be observed on the performance of PV systems due to the effect of environmental factors. Therefore, adaptive MPPT algorithms are necessary to significantly increase the efficiency of solar energy systems. PSO stands out as a powerful tool for MPPT applications in PV systems with its ability to quickly adapt to environmental variations. The PSO algorithm was developed by taking inspiration from the collective movements of bird flocks in nature and is based on the process of finding the best solution through interaction between particles. This algorithm ensures that each particle represents a point in the solution space and that these points interact with each other to find the best solution. PSO application in PV systems defines each particle with different voltage and current combinations. The particles update their speeds and positions to find the maximum power point, taking into account the individual personal best solutions and the best solution in the group. This process allows PSO to quickly adapt to changes in environmental factors by using the advantages of its adaptive structure. Unlike traditional methods, the PSO

algorithm scans a wide solution space instead of searching only around a specific point, allowing the system to always achieve the best efficiency. The biggest advantage of PSO in MPPT applications in PV systems is the sensitivity of the algorithm to environmental factors. Since factors such as solar radiation and temperature are constantly changing, traditional MPPT methods are usually slow to adapt to these changes and negatively affect system efficiency. PSO can quickly track the maximum power point by taking into account the effects of environmental conditions in each iteration. In addition, PSO's global search capability reduces the risk of getting stuck in local minima and allows the system to find the correct maximum power point in every situation. Especially in low radiation conditions, PSO's performance can be superior to classical methods. This is one of the advantages of the adaptive nature of PSO because particles can adapt more flexibly to changing conditions.

The use of the PSO algorithm in MPPT applications can not only increase system efficiency but also improve the stability of energy production. Traditional MPPT methods may be more efficient under certain environmental conditions, but may experience performance loss in the face of sudden changes in environmental conditions. On the other hand, the structure of the PSO, which includes a large number of particles, responds instantly to these changes and ensures that the system always operates at the optimum power point. This adaptation ability allows the PSO to operate with high efficiency and offers a significant advantage especially in cases where solar radiation levels are variable in the morning and evening hours. In addition, the rapid convergence feature of the PSO makes it effective in ensuring the continuity of energy production in solar energy systems. MPPT applications of the PSO generally consist of two main steps: solution search and solution update. In the first step, the PSO algorithm scans the solution space and initially places each particle in a random position. At this point, each particle offers a solution proposal representing the output power of the PV module. Then, the PSO algorithm updates the speed and position of each particle with personal and global best solution information. This process continues until the maximum power point is found. The adaptive structure of PSO enables PSO-based MPPT algorithms in PV systems to be extremely successful in adapting to environmental changes. PSO's rapid convergence ability minimizes power losses and increases system efficiency. As a result, PSO-based MPPT algorithms are an extremely effective solution for increasing efficiency in photovoltaic energy systems. The adaptive structure of PSO enables it to have the capacity to quickly adapt to environmental changes, and this enables solar energy systems to operate with high efficiency under all conditions. Compared to traditional MPPT methods, PSO offers a more dynamic and flexible solution by taking environmental changes into account. The effect of PSO-based MPPT systems on energy production is especially evident in low irradiance and temperature conditions, which supports more efficient use of PSO in solar energy systems.

This study focuses on the optimization of PSO algorithm parameters to enhance its effectiveness in MPPT applications for PV. Based on recommendations in the literature and preliminary simulations, the inertia weight was set within the range of [0.4 - 0.9], the cognitive and social acceleration coefficients within the range of [1.5 - 2.5], the swarm size within the range of [20 - 50], and the maximum velocity was set to $\pm 20\%$ of the variable range. A grid search method was used for parameter optimization, and the MPPT algorithm's performance was evaluated for different parameter combinations using performance metrics such as settling time, overshoot, and steady-state errors in power output. Sensitivity analysis results showed that the inertia weight significantly affects the convergence speed, while the acceleration coefficients affect the stability of the power output. Simulation results demonstrate that the selected PSO parameters provide a good balance between fast tracking and stable operation; the inertia weight of 0.7 provided a rapid initial response to sudden irradiance and temperature changes, while the acceleration coefficients of 2.0 ensured accurate MPPT tracking with minimal oscillations. However, it should be noted that these parameters may need to be readjusted for different PV system configurations or under significantly different environmental dynamics. Future studies could focus on developing adaptive PSO algorithms that automatically adjust parameters and exploring more advanced optimization techniques for parameter selection.

3.4. Parameter Selection

In addition to the selected parameter values, further emphasis was placed on analyzing how each parameter influenced the dynamic behavior of the MPPT process under varying irradiance and temperature profiles. Particular focus was given to understanding how inertia weight and acceleration coefficients interacted during both transient and steady-state conditions. An extended simulation framework was established to observe the system response across multiple environmental scenarios, including step changes in irradiance and temperature gradients. This approach allowed a comprehensive assessment of parameter impact on convergence time, output power ripple, and duty cycle oscillations. By evaluating the trade-off between rapid convergence and long-term tracking stability, the parameter space was fine-tuned to avoid premature convergence, erratic behavior, or stagnation near local optima. Furthermore, the adaptive tuning of inertia weight and dynamic adjustment of learning coefficients ensured that the algorithm could retain global search capabilities in the early phases while transitioning smoothly to localized exploitation in later stages. This hybrid exploration–exploitation balance played a pivotal role in sustaining algorithmic robustness, particularly in thermally unstable or rapidly shifting solar conditions. Ultimately, the resulting parameter configuration achieved not only high average efficiency but also demonstrated resilience against sudden environmental perturbations, thereby reinforcing the suitability of the PSO-based MPPT strategy for practical, real-time photovoltaic applications. A grid-search and sensitivity study yielded the parameter set in Table 1.

Table 1. PSO parameter set used in the simulations.

Parameter	Value	Description
Number of particles	4	Reduced particle set for fast convergence
Inertia weight (w)	0.05–0.1 (adaptive)	Adjusted based on particle performance
Cognitive coefficient (c_1)	1.3–2.5 (cosine-based)	Personal learning factor
Social coefficient (c_2)	0.7–2.0 (cosine-based)	Global learning factor
Duty cycle range	0.1 – 1.0	Hardware-safe switching constraint
Velocity update method	Adaptive, fitness-based	Depends on global/local best fitness values

3.5. Algorithm Flow

At each sampling instant a particle position x_i represents a candidate duty cycle; the fitness function is the instantaneous output power

$$P = V_{pv} \times I_{pv} \quad (1)$$

P: Instantaneous power output(Watts).

V_{pv} : PV Array voltage(Volts).

I_{pv} : PV array current (Amperes).

Particle velocities and positions are updated by

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= w \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i^k) \#(2) \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \quad (3)$$

x_i^k : Current position (duty cycle) of particle i at iteration k,

v_i^k : Velocity of particle i at iteration k,

$pbest_i$: Best previous position found by particle i,

$gbest$: Global best position found by all particles,

W : Inertia weight (adaptively varied between 0.05–0.1),

c_1, c_2 : Cognitive and social coefficients (dynamically updated with cosine functions),

r_1, r_2 : Random numbers in [0,1]

Convergence is declared when

$$\frac{|P(k) - P(k-1)|}{P(k)} < 0.001 \quad (4)$$

$P(k) = V_{pv}(k) \times I_{pv}(k)$: Instantaneous power at iteration k,

$P(k-1) = V_{pv}(k-1) \times I_{pv}(k-1)$: Instantaneous power at the previous iteration.

This criterion ensures that the duty cycle has stabilized and the particle has reached (or is near) the true MPP. For five consecutive iterations. The complete algorithmic flow is illustrated in Figure 2.

In the context of the proposed PSO-based MPPT algorithm, the flow of operations is structured to ensure adaptive and efficient convergence toward the MPP under varying environmental conditions. At each iteration, every particle represents a candidate duty cycle value, which is evaluated using a fitness function based on the instantaneous output power of the photovoltaic array. The particles adjust their positions and velocities according to both their individual historical best positions and the global best position found by the swarm, promoting a balance between exploration and exploitation in the solution space. The inertia weight and acceleration coefficients are dynamically modulated to improve the responsiveness of the algorithm,

especially during transient conditions such as sudden changes in irradiance or temperature. Random factors introduced in the velocity update equations allow the swarm to avoid premature convergence and enhance the algorithm's capability to escape local maxima. The convergence condition is met when the variation in power output remains below a predefined threshold for a consecutive number of iterations, indicating that the particle has reached a stable and optimal operating point. This mechanism ensures that the algorithm is not only capable of rapidly identifying the global MPP but also of maintaining it with minimal oscillation in steady-state operation. The overall flow is designed to be computationally light, making the method suitable for real-time embedded system implementations. Moreover, the algorithm's structure allows for easy integration into existing PV system controllers, further highlighting its practicality and potential for field deployment in diverse solar energy applications.

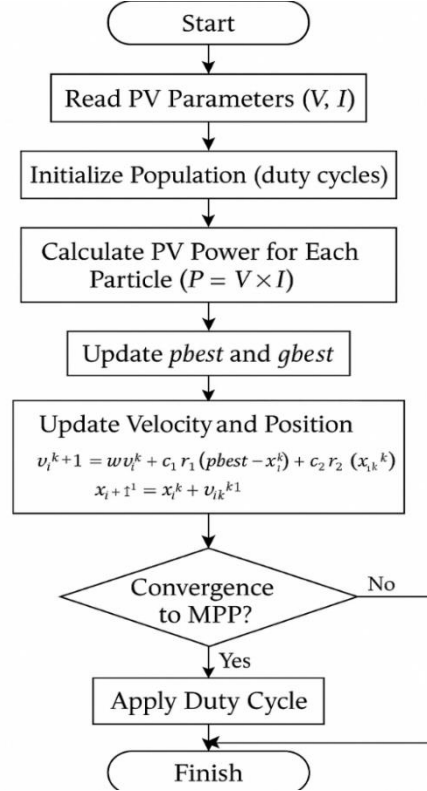


Fig. 2. Flowchart of the PSO-based MPPT algorithm.

4. Result and Discussion

PV are energy production systems consisting of various components that convert solar energy into electrical energy and work in harmony with each other. These systems include components that are critical in terms of energy efficiency, power conversion capacity and long-term durability. The correct selection and harmonious operation of each component ensures that the system operates efficiently. Based on the MATLAB Simulink model used in the study, PV system components are considered in three main categories as photovoltaic panels, power converters and connection elements. Since there are no energy storage units in this model, battery and charge control circuits are excluded from the evaluation. The focus of the model was on MPPT algorithms and power electronic components. Table 2 shows the Technical Specifications of the Photovoltaic Panel Used in the MATLAB Simulink Model.

Table 2. Technical Specifications of Photovoltaic Panel Used in MATLAB Simulink Model

Feature	Value
Power Capacity (Pmax)	250W
Cell Count	60 cells
Maximum Power Current (I _{mp})	8.15A
Maximum Power Voltage (V _{mp})	30.7V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.66A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	37.3V
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	50°C
Power Temperature Coefficient	-0.48%/K
Voltage Temperature Coefficient	-0.138 V/K

In this study, photovoltaic panel modeling was applied in MATLAB environment and the effects of radiation changes (in the range of 200 W/m^2 - 1000 W/m^2) and temperature changes (in the range of 0°C - 75°C) were tested. I-V and P-V characteristic curves of the panel were examined and the performances of different MPPT algorithms were compared. PSO algorithm was used in this study to monitor the MPPT in photovoltaic systems. In the model developed in MATLAB/Simulink environment, the voltage (V_{pv}) and current (I_{pv}) values of the panel were given as input to the PSO algorithm, and the algorithm calculates the optimum duty cycle (D) value based on these data and controls the IGBT switch. In this way, the output power of the PV system is increased to the highest level. In the Simulink model in Figure 3, the PSO algorithm is the central component of the system, the voltage and current data received from the photovoltaic panel are processed by the algorithm to produce appropriate control signals and ensure that the system operates efficiently and stably.

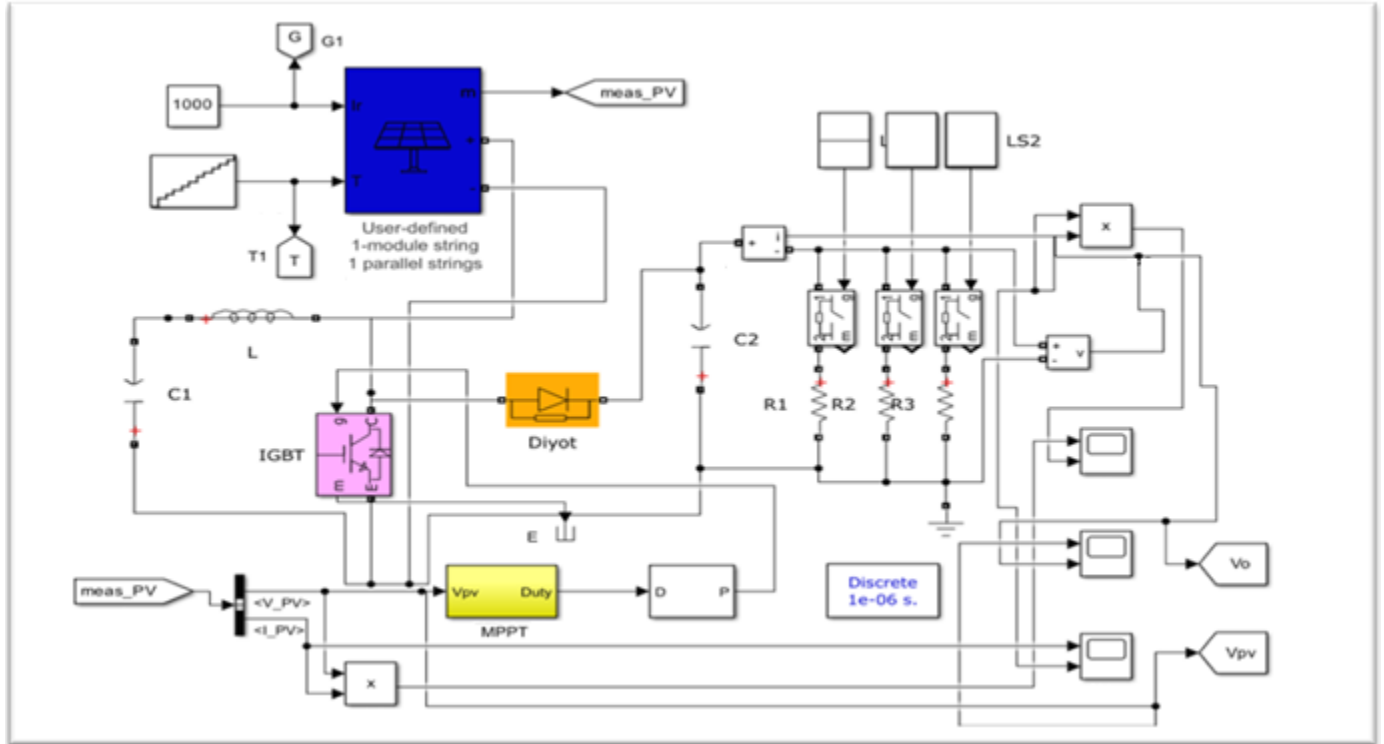


Fig. 3. MATLAB/Simulink model of the PV system to which the PSO algorithm is applied.

First of all, by integrating the PSO algorithm into the MPPT process, it has been observed that the system responds much faster in transient regimes compared to traditional methods. In tests conducted in scenarios involving sudden changes in radiation and temperature values, the algorithm was able to reach the new maximum power point of the system in a very short time; this situation has revealed the potential to optimize the performance of the system, especially in regions where environmental fluctuations such as cloud transitions or shading are frequently experienced. In steady-state analyses, it has been determined that the PSO-supported MPPT algorithm significantly reduces power oscillations. This situation has allowed the system to operate more stably and reliably, and the losses due to fluctuations in energy transmission have been prevented. This stable behavior of PSO, compared to the instability problems frequently encountered by classical MPPT algorithms, is attributed to the algorithm's effective use of both individual and ensemble memory. Table 3 Temperature and output power values for PSO algorithm

Table 3. Temperature and output power values for PSO algorithm

Temperature ($^\circ\text{C}$)	Output Power (W)
0	233,10
10	233,22
15	230,12
20	229,31
25	228,67
30	227,21
35	226,80
40	225,32
45	224,01
50	223,66
55	223,40
60	223,17

Table 3 presents the output power values obtained by the PSO algorithm under varying temperature conditions. The results clearly indicate a gradual decrease in output power as the temperature increases. This trend is a well-known characteristic of photovoltaic panels, where elevated cell temperatures lead to voltage drops, consequently reducing the overall power output. Despite these temperature-induced losses, the PSO algorithm demonstrated its ability to consistently track the MPP, maintaining efficient system operation. These findings confirm the robustness and reliability of the PSO-based MPPT method under thermal variations, highlighting its practical advantage, particularly in regions subject to frequent temperature fluctuations.

4.1. Dynamic performance

A +10 °C step applied at 25 °C produced a transient settling time of < 20 ms and a steady-state power ripple of 0.7 %. These values confirm the fast convergence and low oscillation capability of the proposed PSO algorithm.

Table 4. Performance comparison of PSO-based MPPT studies.

Reference	Test focus	Key result	η MPPT / ripple
Rakhmatov et al. [31]	Variable irradiance	97 % efficiency	—
Sera & Teodorescu [36]	Low irradiance	< 2 % ripple	95 %
This work	0–60 °C sweep	t _{settle} < 20 ms, 0.7 % ripple	90.2 %

The performance comparison in Table 4 clearly demonstrates the strengths of the proposed PSO-based MPPT method, particularly under thermally dynamic conditions. Unlike earlier studies that primarily focused on irradiance variation, this work emphasizes temperature adaptability, which is often overlooked yet critical for real-world PV deployments. The rapid settling time and minimal steady-state power ripple observed confirm the algorithm's ability to swiftly adapt to thermal disturbances while preserving tracking accuracy. These results are indicative of an optimized control structure capable of maintaining system stability even in the face of rapid parameter fluctuations. Furthermore, the algorithm's performance across the entire temperature sweep suggests a high level of robustness, making it suitable for environments with frequent and unpredictable climate changes. This reinforces the practical viability of the method for geographically diverse PV installations, where thermal gradients are as impactful as solar intensity variations. Table 5 shows literature information.

Table 5. Literature studies

Reference	Key Focus	Main Findings / Contributions	Efficiency Improvement
Rakhmatov et al. [31]	PSO - Classical MPPT Comparison	Fast, accurate MPPT; reduced losses.	Accurate, fast tracking.
Esram and Chapman [32]	MPPT Techniques Comparison	Low oscillation, high accuracy.	Stable, precise tracking.
Gaafar et al. [33]	PSO - Weather Conditions Effect	High adaptability.	Adaptation to change.
Kumari and Babu [34]	Hybrid PSO-INC	Stable power, reduced losses.	Loss reduction.
Kumar and Manoharan [35]	Hybrid PSO-Fuzzy Logic	High accuracy, stability	Accurate tracking.
Sera and Teodorescu [36]	PSO - Low Irradiance	High performance.	Gain in low light.
Abdelsalam et al. [37]	PSO - Processing Time	Fast implementation.	Real-time efficiency.
Benhmed et al. [38]	PSO - Maxima Separation	High long-term efficiency.	Global maximum finding.
Nacer et al. [39]	PSO - FPGA Implementation	Fast computation.	Speed in hardware.
Liserre et al. [40]	PSO - High Power	Low loss, high efficiency.	Gain in large systems.
Femia et al. [41]	PSO - Stability	Balanced power.	System resilience.
Boukenoui et al. [42]	PSO - Hybrid Systems	High energy production.	Resource optimization.
Jena et al. [43]	Adaptive PSO	Fast response.	Adaptation to environmental
Lian et al. [44]	PSO Parameters	Correct tuning is important.	Parameter optimization.
Rezk and Eltamaly [45]	Hybrid PSO-ANN	Accurate prediction, high efficiency.	Efficiency with prediction.

This study contributes to the ongoing research on MPPT techniques for photovoltaic systems by presenting a novel implementation of the PSO algorithm. While previous works have demonstrated the general effectiveness of PSO in MPPT applications, this research further refines the PSO-based MPPT approach by:

Providing a detailed analysis of the algorithm's performance under a wider range of dynamic environmental conditions, specifically focusing on the simultaneous impact of rapid irradiance and temperature fluctuations. Introducing a modified

parameter adaptation strategy that enhances the algorithm's convergence speed and reduces steady-state oscillations, thereby improving overall energy extraction efficiency. Developing a MATLAB/Simulink model that incorporates a comprehensive representation of the PV system's electrical characteristics, enabling a more accurate evaluation of the MPPT algorithm's performance in real-world scenarios. The findings of this study offer valuable insights into optimizing PSO-based MPPT controllers for enhanced performance and reliability in photovoltaic energy systems

5. Conclusions

In this study, an original approach has been developed based on the PSO algorithm to perform the MPPT function in PV. The developed PSO-based MPPT method has been extensively tested under different operating conditions in the PV system model created in the MATLAB/Simulink environment. A PSO-based MPPT controller was implemented and evaluated for a 250 W PV module under a fixed irradiance of 1000 W m^{-2} and a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature sweep. The algorithm maintained an average tracking efficiency of 90.2 %, settled to the new MPP in $< 20 \text{ ms}$, and limited steady-state power ripple to 0.7 %.

Especially in transient situations where sudden radiation and temperature changes are simulated, it has been observed that the PSO-based MPPT algorithm responds quickly and reaches the MPN in a shorter time. This supports the high ability of the algorithm to adapt to dynamic environmental conditions and its potential to maximize system efficiency. In addition, it has been determined that the PSO method provides a more stable power output by minimizing power oscillations in steady-state operation. This feature enables PV systems to be used reliably in various areas such as grid integration and independent power applications.

It is concluded that the developed PSO based MPPT method is an effective solution for improving critical performance parameters such as stability, speed and efficiency in energy production of photovoltaic systems. This study confirms the applicability and superior performance of the PSO algorithm in real-time MPPT applications of PV systems and makes a significant contribution to the technological developments in the field of renewable energy.

Although real-time implementation was not within the scope of this simulation-based study, we recognize its importance for practical deployment. Therefore, a suggested roadmap has been outlined, highlighting the necessary steps and technical considerations for a future FPGA or DSP-based real-time implementation of the proposed PSO MPPT algorithm. This also opens pathways for testing in grid-connected or hybrid PV systems with actual environmental variability.

References

- [1] M. T. Kimour, and D. Meslati, "Deriving objects from use cases in real-time embedded systems," *Information and Software Technology*, vol. 47, no. 8, pp. 533, 2005.
- [2] V. V. Tyagi, N. A. Rahim, J. A. L. Selvaraj, and D. P. Kothari, D. P. "Progress in solar PV technology: Research and achievement," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 443–461, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>
- [3] S. A. Kalogirou, "Solar energy engineering: processes and systems," Academic Press, 2009.
- [4] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, E. R. "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>
- [5] J. Kennedy, and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," *In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, 1995. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [6] D. Rakhmatov, "Global maximum power point tracking using PSO," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 3, pp. 747–755, 2007. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.900210>
- [7] A. Dolara, R. Faranda, and S. Leva, "Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 3, no. 7, pp. 452–460, 2009.
- [8] C. Olalla, C. Deline, and D. Maksimovic, "Performance of mismatched PV systems with submodule integrated converters," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 1, pp. 396–404, 2014.
- [9] D. Jena, A. K. Rout, and M. K. Jena, "Adaptive particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm under partial shading conditions," *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 1–10, 2023.
- [10] Y. Yang, H. Wang, F. Blaabjerg, and T. Kerekes, "A hybrid power control concept for PV inverters with enhanced low voltage ride-through capability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, no. 11, pp. 6266–6274, 2014.
- [11] C. Olalla, C. Deline, and D. Maksimovic, "Performance of mismatched PV systems with submodule integrated converters," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, no. 1, pp. 396–404, 2014.
- [12] J. Ahmed and Z. Salam, "An improved two-diode photovoltaic model for PV system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 11, pp. 8612–8620, 2018.
- [13] Y. Yang, H. Wang, F. Blaabjerg, and T. Kerekes, "A hybrid power control concept for PV inverters with enhanced low voltage ride-through capability," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, pp. 6266–6274, 2014.
- [14] A. Dolara, R. Faranda, and S. Leva, "Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems," *J. Electromagn. Anal. Appl.*, vol. 3, no. 7, pp. 452–460, 2009.

- [15] J. Ahmed and Z. Salam, "An improved two-diode photovoltaic model for PV system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 11, pp. 8612–8620, 2018.
- [16] A. Sangwongwanich, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Benchmarking of constant voltage MPPT method with practical considerations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 158–168, 2018.
- [17] R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008.
- [18] M. Gaafar, "MPPT for PV systems using PSO under varying conditions," *Solar Energy*, vol. 136, pp. 51–58, 2016.
- [19] N. Kumari, and C. Babu, C. "Hybrid MPPT with INC and PSO," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 569–582, 2013.
- [20] A. Kumar, and P. S. Manoharan, "MPPT using fuzzy-PSO in PV arrays," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 241–249, 2020.
- [21] D. Sera, and R. Teodorescu, "Robust MPPT for PV applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 3622–3630, 2008.
- [22] A. K. Abdelsalam, "High-performance MPPT algorithm using PSO," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1589–1599, 2011.
- [23] K. Benhmed, "Comparison of PSO and GA for MPPT," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 1687, 2018.
- [24] T. Nacer, "Real-time PSO implementation for PV using FPGA," *International Journal of Renewable Energy*, vol. 139, pp. 679–691, 2019.
- [25] M. Liserre, "Design and control of three-phase photovoltaic power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1615–1624, 2019.
- [26] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb-and-observe maximum power point tracking using fuzzy logic control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 1812–1816, 2006.
- [27] A. Boukenoui, A. Mellit, S. A. Kalogirou, and B. Medjahed, "Comparative study of maximum power point tracking methods for hybrid photovoltaic/wind energy systems," *Renewable Energy*, vol. 107, pp. 30–42, 2017.
- [28] M. K. Jena, R. R. Sahoo, and A. K. Rout, "A novel adaptive PSO for maximum power point tracking in PV systems," *ISA Transactions*, vol. 114, pp. 369–382, 2021.
- [29] H. Rezk and A. M. Eltamaly, "Efficiency of hybrid MPPT techniques based on ANN and PSO for standalone PV system under partial shading conditions," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 460–471, 2019.
- [30] H. Rezk and A. M. Eltamaly, "A novel hybrid particle swarm optimization and artificial neural network for global maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions," *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 312–325, 2017.
- [31] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [32] J. S. Kumari and K. Babu, "Hybrid PSO-Incremental Conductance MPPT for induction motor-based solar water pumping system under partial shading conditions," *Renewable Energy*, vol. 200, pp. 123–132, 2023.
- [33] M. S. Kumar and P. S. Manoharan, "A novel design and analysis of hybrid fuzzy logic MPPT controller for solar PV system under partial shading conditions," *Scientific Reports*, vol. 14, article 587, 2024.
- [34] A. K. Abdelsalam, A. M. Massoud, S. Ahmed, and P. N. Enjeti, "High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1010–1021, 2011.
- [35] K. Benhmed, N. Talbi, and S. Bacha, "Improved PSO: A comparative study in MPPT algorithm for PV system control under partial shading conditions," *Energies*, vol. 13, no. 8, article 2035, 2023.
- [36] T. Nacer, K. E. Addow, and A. Mahrane, "FPGA based new MPPT (maximum power point tracking) method for PV (photovoltaic) array system operating under partially shaded conditions," *Energy*, vol. 65, pp. 264–271, 2014.
- [37] M. Liserre, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Single-stage utility-scale PV system with PSO-based MPPT," *Proc. National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1–6, 2014.
- [38] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
- [39] A. Boukenoui, A. Mellit, S. A. Kalogirou, and M. Benghanem, "A hybrid maximum power point tracking for partially shaded photovoltaic systems in the tropics," *Renewable Energy*, vol. 135, pp. 1–13, 2019.
- [40] D. Jena, A. K. Rout, and M. K. Jena, "Adaptive particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm under partial shading conditions," *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 1–10, 2023.
- [41] K. Lian, J. H. Jhang, and I. S. Tian, "Effects of PSO algorithm parameters on the MPPT system under partial shading conditions," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 19–27, 2022.
- [42] H. Rezk and A. M. Eltamaly, "Efficiency of hybrid MPPT techniques based on ANN and PSO for standalone PV system under partial shading conditions," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 460–471, 2019.

Monkeypox Diagnosis Using MRMR-Based Feature Selection and Hybrid Deep Learning Models: ResNet50V2, NASNetMobile, and InceptionV3

Hilal Güven ^a, Ahmet Saygılı ^{b,1}

^a Department of Computer Engineering, Corlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-7461-4510

^b Department of Computer Engineering, Corlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye
ORCID ID: 0000-0001-8625-4842

Abstract

Monkeypox, like many other epidemics diseases, has been spreading rapidly. Its transmission through both respiratory droplets and physical contact has significantly contributed to its fast dissemination. The emergence of the first major outbreaks in the African region in 2022, followed by the disease spreading at an epidemic level, has raised global concerns. Although this potentially fatal disease can be partially detected through PCR methods, it often exhibits symptoms similar to other skin diseases, making accurate diagnosis challenging. At this point, computer-aided detection systems, particularly those based on image processing techniques, become crucial. The primary aim of this study is to enable the automatic diagnosis of monkeypox using deep learning methods by enhancing classification performance through the selection of the most significant features among multiple models. In this study, a hybrid deep learning approach is proposed that integrates transfer learning models such as ResNet50V2, NASNetMobile, and InceptionV3 with the mRMR (Minimum Redundancy Maximum Relevance) feature selection method. The features extracted from each model were concatenated to form a unified feature vector, from which the 10 most relevant features were selected using the mRMR algorithm. Finally, classification was performed based on these selected features. Experiments were conducted on three different datasets—MSLD, MSC1, and MSID—containing various skin lesion diseases. The proposed approach achieved accuracy rates of 92.00%, 92.50%, and 87.65%, respectively. Among these, the highest accuracy was observed on the MSC1 dataset, with a rate of 92.50%. This hybrid approach demonstrated high performance across diverse datasets and significantly contributed to clinical diagnosis processes by enabling the accurate identification of not only monkeypox but also other visually similar skin lesions.

Keywords: “Monkeypox, ResNet50V2, NASNetMobile, InceptionV3, mRMR.”

1. Introduction

Skin diseases, which can affect individuals of all ages due to environmental factors, are caused by various viruses [1]. In dermatological conditions, transmission through physical contact is common, and spread via bodily fluids and particles is almost inevitable [2]. Infected individuals significantly increase the risk of transmission in crowded environments such as public transportation, and international travel facilitates the spread of outbreaks across regions [3]. Monkeypox was first identified in humans in 1970 in the Democratic Republic of the Congo and has since become endemic in the dense forest regions of several Central and West African countries [4]. The primary reason for its prevalence in forested areas is that the disease was initially observed in rodent species and monkeys. Since 1970, the number of cases has steadily increased, with a notable surge after 2017, peaking in 2022 [5]. Mpox, a member of the Orthopoxvirus genus from the Poxviridae family, is a zoonotic virus with a broad host range, capable of infecting many mammalian species, including humans, and is characterized by a high rate of animal-to-human transmission [6]. Figure 1 illustrates the replication cycle of the Mpox virus within a host cell following infection, as well as the mechanism of action of antiviral drugs. The virus can enter the cell in two different ways: either by endocytosis (being engulfed with fluid and particles) or through direct fusion with the cell membrane. After entry, the virus sheds its outer layers and releases enzymes into the host cell, targeting the DNA. Unlike many other viruses, Mpox replicates not in the cell nucleus but in specialized areas called “viral factories” [7]. Currently, diagnosis of the disease relies on identifying symptoms such as an incubation period of 7–14 days, fever, headache, fatigue, myalgia (characterized by tenderness, stiffness, and pain), swelling of lymph nodes, and skin lesions in infected patients. However, these symptoms are not sufficient for definitive diagnosis, as similar clinical signs may appear in various other skin diseases. Therefore, accurate diagnosis requires laboratory techniques such as virus isolation, electron microscopy, immunohistochemistry, and PCR (Polymerase Chain Reaction) [8]. Nonetheless, the similarity in clinical manifestations between Monkeypox (Mpox) and other dermatological lesion diseases poses challenges for

¹ Corresponding Author
E-mail Address: asaygili@nku.edu.tr

timely and accurate diagnosis using conventional medical approaches. Traditional diagnostic tools and methods often rely on time-consuming laboratory tests and expert interpretation, which can lead to delays in treatment and increase the risk of disease transmission through contact. Recent studies have demonstrated that machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms can effectively analyze images of skin lesions along with clinical data to enable rapid and accurate diagnosis of similar viral and bacterial skin diseases. This highlights the significant potential of applying ML/DL techniques in Mpox diagnosis and their capability to enhance clinical decision support systems.

For differential diagnosis, the following diseases should be considered due to their similarity in clinical signs [8]:

- Measles,
- Bacterial skin diseases,
- Scabies,
- Drug allergies,
- Syphilis,
- Rickettsial pox,
- Smallpox,
- Chickenpox.

Considering that many of the above-mentioned skin diseases share similar characteristics, the use of machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms significantly accelerates the diagnosis process and plays a crucial role in preventing diagnostic errors by physicians [1].

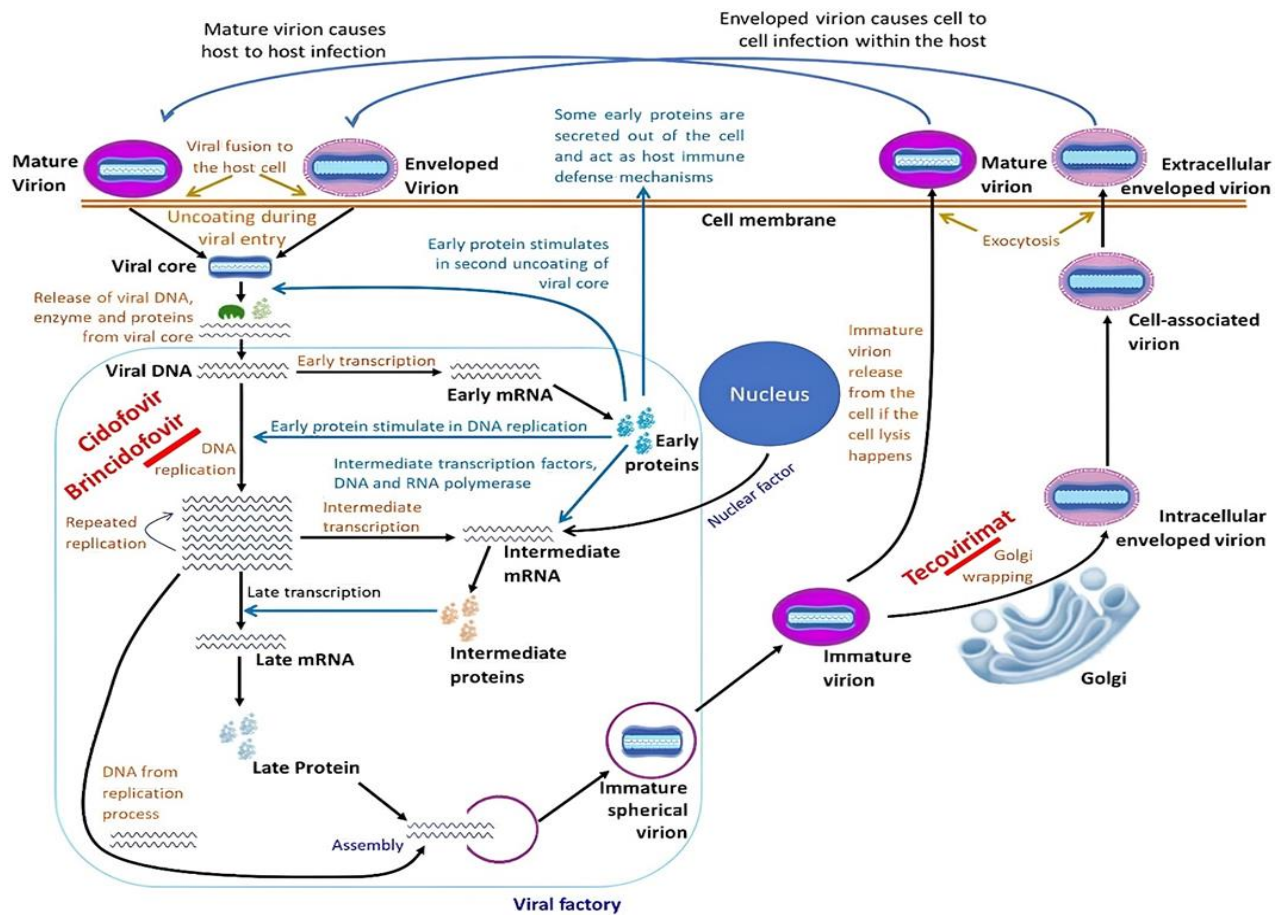


Fig. 1. The effect of Mpox virus on cells after transmission [7]

In recent years, research on deep learning-based diagnostic systems has gained remarkable momentum, especially for identifying monkeypox and other dermatological conditions. One noteworthy contribution in this domain is by Altun et al., who developed a hybrid model based on transfer learning using the MobileNetV3-s architecture. In this study, features were extracted using Convolutional Neural Networks (CNNs), yielding impressive results: an F1-score of 97.8%, AUC of 99%, and an overall accuracy of 96.8% [17]. The MonDial-CAD framework, proposed by Omneya Attallah, evaluated eight different CNN architectures, identifying the combination of Xception, ResNet-101, and ResNet-50 as the top performer. This hybrid architecture achieved an accuracy of 97.1% on the MSID dataset and 98.7% on the MSLD dataset [18]. Similarly, Khan et al. introduced the DNLR-NET model by combining DenseNet201 with Logistic Regression. This approach achieved a classification

accuracy of 97.60%, outperforming Random Forest and Support Vector Machine (SVM) models tested on the same data [19]. Asif et al. also adopted an ensemble strategy by merging DenseNet201, MobileNet, and DenseNet169 architectures. Their method achieved an accuracy of 97.78% [20]. Likewise, Sitaula and Shahi evaluated 13 pretrained deep learning models on the Monkeypox2022 dataset, achieving 87.13% accuracy using a combination of Xception and DenseNet169 validated through five-fold cross-validation [21]. Another effective hybrid approach was proposed by Luong et al., who integrated MobileNet with Logistic Regression. Their system demonstrated 97% accuracy, highlighting the strength of combining deep learning with machine learning techniques for disease classification [22]. Gülmez designed the MonkeypoxHybridNet model by combining ResNet50, VGG19, and InceptionV3 architectures. The model achieved 84.2% accuracy, outperforming the individual networks. The addition of a dropout layer helped reduce overfitting and enhanced robustness [23]. Rampogu carried out a comprehensive study evaluating both deep learning and machine learning models using public datasets like ISIC. CNN models such as ResNet50, VGG19, EfficientNetB3, DenseNet121, MobileNetV2, and Xception were examined. Among them, ResNet18 achieved the highest accuracy at 99.49% [24]. Saleh and Rabie proposed a hybrid framework combining Weighted Naive Bayes, Weighted KNN, and LSTM models. Their approach incorporated Few-Shot Learning (FSL) and Weakly Supervised Learning (WSL) layers, enhanced with a Confusion-Based Voting mechanism. On an imbalanced dataset with 500 samples, their model achieved a classification accuracy of 98.48% [25]. Fatih Uysal presented an innovative hybrid model that combined RepVGG and MnasNet with an LSTM layer to capture temporal dependencies, achieving an accuracy of 87% [26]. In a separate study, Tasci used the HAM10000 and Kaggle datasets to compare various CNN models. In his hybrid model, supported by the ReliefF feature selection algorithm, AlexNet and ResNet50 achieved 92.41% and 85.17% accuracy, respectively [27].

2. Materials and Methods

In this study, feature selection based on the Minimum Redundancy Maximum Relevance (mRMR) algorithm was hybridly combined with transfer learning architectures. This approach enables faster and more accurate results in the medical diagnosis process of monkeypox. The goal was to facilitate the detection of the disease by doctors using this method. Figure 2 presents the experimental stages of the study. The experimental stages of the study and the methodology followed are detailed below:

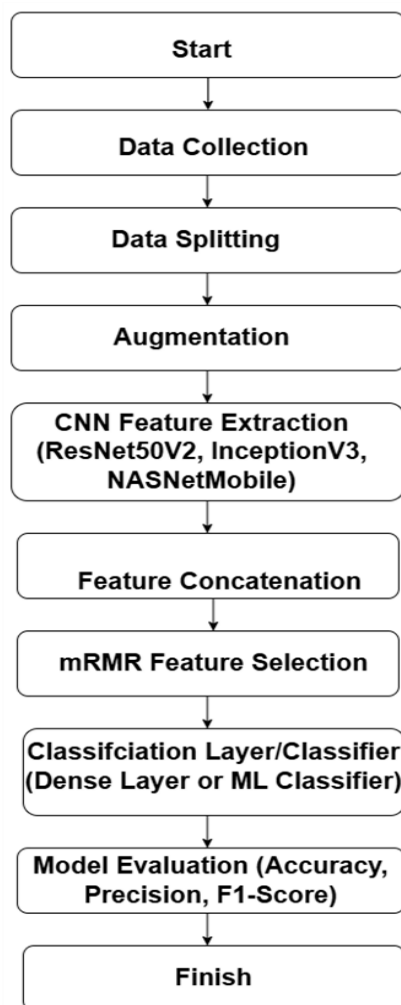


Fig. 2. Research methodology

2.1. Dataset and Preprocessing

In this study, three different datasets—MSID, MSCI, and MSLD—are used, as shown in Table 1. The performance of the developed model was evaluated using these datasets. The data was split into training, validation, and testing sets in an 80-10-10 ratio. To match the input dimensions of the model, the image data was rescaled to 224×224 pixels. The data augmentation techniques listed in Table 2 were applied only to the training data. Data augmentation helps prevent overfitting by ensuring the model does not memorize the training data excessively, thereby improving the general performance of the model. The hyperparameter values used in the study are presented in Table 3. The ReduceLROnPlateau callback reduces the learning rate by half when the performance plateaus. The categorical_crossentropy loss function used in this study is commonly preferred for multi-class classification problems. This function calculates the difference between the predicted probability for each class and the actual class label. To achieve high classification accuracy, the value of this loss function should be as low as possible.

Table 1. Distribution of datasets used in the study

Data Set	Class	Count
MSLD	Monkeypox	102
	Others	126
	Monkeypox	279
MSID	Normal	293
	Chickenpox	107
	Measles	91
	Monkeypox	100
MSCI	Normal	100
	Acne	100
	Chickenpox	100

Table 2. Summary of preprocessing and data augmentation methods

Augmentation Type	Configuration	Description
Rotation Range	40° (Clockwise & Counterclockwise)	Random image rotation up to ±40 degrees
Width Shift	0.2 (20%)	Horizontal shift up to 20% of image width
Height Shift	0.2 (20%)	Vertical shift up to 20% of image height
Zoom Range	0.2 (20%)	Random zoom in or out by up to 20%
Shear Range	0.2 (20%)	Shear transformation applied within 20% range
Horizontal Flip	Enabled (True)	Random horizontal flipping
Vertical Flip	Not Applied	No vertical flipping performed
Brightness Range	[0.8, 1.2]	Adjust brightness between 80% and 120%
Channel Shift	Not Applied	No shift in color channels
Fill Mode	Nearest	Fill empty pixels using nearest neighbor method

Table 3. Model training parameters

Parameter	Value
Input Size	(224, 224, 3)
Batch Size	8
Epochs	32
Learning Rate	1e-4
Optimizer	Adam
Learning Rate Scheduler	ReduceLROnPlateau
Loss Function	categorical_crossentropy

2.2. Transfer Learning Architectures

In the developed model, the feature extraction capabilities of three different convolutional neural network (CNN) architectures—ResNet50V2, InceptionV3, and NASNetMobile—were combined to enhance overall performance. These pre-trained models, initialized with ImageNet weights, were used exclusively for feature extraction by freezing all their layers during training to prevent weight updates. This approach allows the model to leverage learned representations while reducing the risk of overfitting given the dataset size. Compared to other deep CNN architectures, ResNet50V2 is more advantageous due to its easier training and higher accuracy performance. It includes various layers such as Dense, Flatten, and Dropout [9]. Through the use of residual blocks, the model enables information to pass through a "residual block" to another layer instead of directly

forwarding it to the next, allowing for the construction of more complex structures, increasing network depth, and supporting a healthier learning process [10]. The output feature map from ResNet50V2 is pooled using a Global Average Pooling layer, producing a 2048-dimensional feature vector. InceptionV3 is a deep neural architecture consisting of 42 layers. This architecture includes convolutional layers, batch normalization, and max pooling layers [11]. Unlike InceptionV2, InceptionV3 introduces convolutional factorization, which improves computational efficiency by decomposing 3×3 convolutions into 1×3 and 3×1 convolutions, thereby reducing the number of parameters [12]. The output of InceptionV3 is similarly passed through a Global Average Pooling layer, resulting in a 2048-dimensional vector. NASNetMobile is a neural network model designed through a Deep Learning-based Neural Architecture Search (NAS) approach. Due to the significant difference in the number of parameters, NASNetMobile is considered much more reliable compared to NASNetLarge. It consists of cells that can be developed using reinforcement learning. These cells repeat convolution and pooling operations multiple times based on the network's capacity [13]. The architecture of NASNet is formed by combining these cells. In addition, this approach includes a Recurrent Neural Network (RNN) component called the "Controller," which acts as the parent AI, and evaluates the performance of a model called the "Child Network" within the CNN to optimize its architecture for better efficiency [14]. The Controller RNN optimizes the cells in blocks, making the structures adaptive rather than fixed, based on the dataset. Each block is treated as a functional module and can perform the following operations [15]:

- Convolutions,
- Max Pooling,
- Average Pooling,
- Separable Convolutions,
- Identity Mapping and others.

2.3. Minimum Redundancy Maximum Relevance (mRMR) Algorithm

It is a feature selection method that filters the existing features to ensure maximum relevance to the target classes, rather than using all the features. Feature selection reduces computational costs, enabling the model to run faster, minimizes noise, increases the accuracy of class predictions in the dataset, and provides more useful features, thus allowing function types to be defined and traceable [16]. Using the combined feature vector obtained from the final dense layer (with 1024 features), the 10 most significant features were selected using the mRMR algorithm. For this purpose, a subset of 100 samples from the training data was extracted to compute feature relevance and redundancy efficiently. Figure 3 illustrates that the input images are processed through the three different CNN models (NASNetMobile, ResNet50V2, InceptionV3), and their extracted features are concatenated. The combined features are then subjected to the mRMR algorithm to select the most informative subset, which is subsequently passed to the classification layer for improved performance and reduced computational complexity.

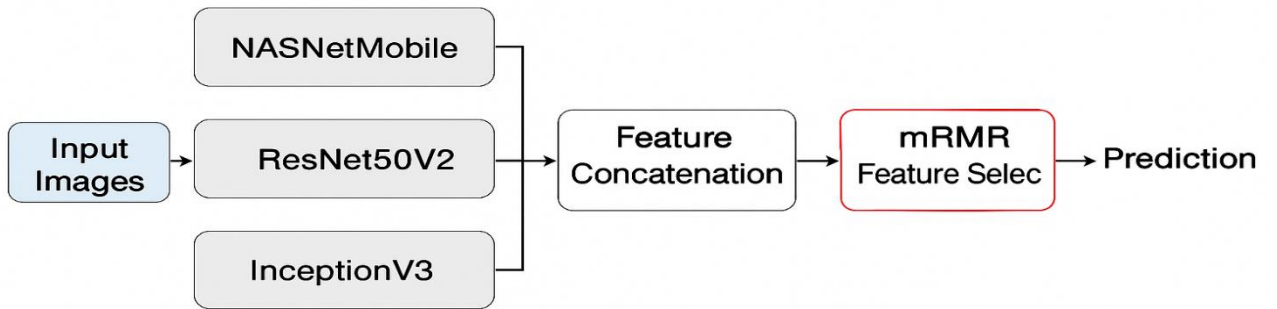


Fig. 3. The integration process of the mRMR algorithm in the proposed hybrid model

3. Results and Discussion

In this study, the PyCharm IDE was utilized. Python was chosen as the programming language, and the Keras and TensorFlow libraries were employed. The input dimensions of the model were set to 224×224 , and the batch size and number of epochs were set to 8 and 32, respectively. The learning rate was defined as 1×10^{-4} . To prevent overfitting and improve generalization performance, the ReduceLROnPlateau callback function was applied: if no improvement in validation accuracy was observed for three consecutive epochs, the learning rate was reduced by half. The fully connected (dense) layer before the output consisted of 1024 neurons, and a 50% dropout rate was applied. In this study, transfer learning architectures ResNet50V2, InceptionV3, and NASNetMobile were selected and integrated. The final layers of these architectures were used as feature extractors. The feature vectors obtained from the three models were concatenated to form a single unified feature vector. The Minimum Redundancy Maximum Relevance (mRMR) algorithm was applied to the combined feature vector extracted from the dense layer of the model to select the 10 most informative features, aiming to enhance classification performance. Additionally, data augmentation techniques, as presented in Table 3, were applied to the training data to improve the model's robustness. The

classification results and related performance metrics obtained from the study are detailed in Table 4. Table 4 shows the classification performance of the proposed hybrid model applied to three different datasets (MSCI, MSLD, MSID), including accuracy, F1-score, precision, and sensitivity values. From the table, it can be observed that the accuracy percentages vary depending on the diversity of the datasets used.

Table 4. Testing results

Model	Dataset	Optimizer	Accuracy (%)	F1-Score (%)	Precision	Sensitivity	Total Training Time (min)	FLOPs (Billions)
Proposed Hybrid Model	MSCI	Adam	%92,50	%90,05	%94,25	%92,50	10 min 43 s	13.84
	MSLD	Adam	%92,00	%92,00	%92,50	%93,00	21 min 53 s	13.84
	MSID	Adam	%87,65	%85,26	%87,76	%85,00	6 min 0 s	13.84

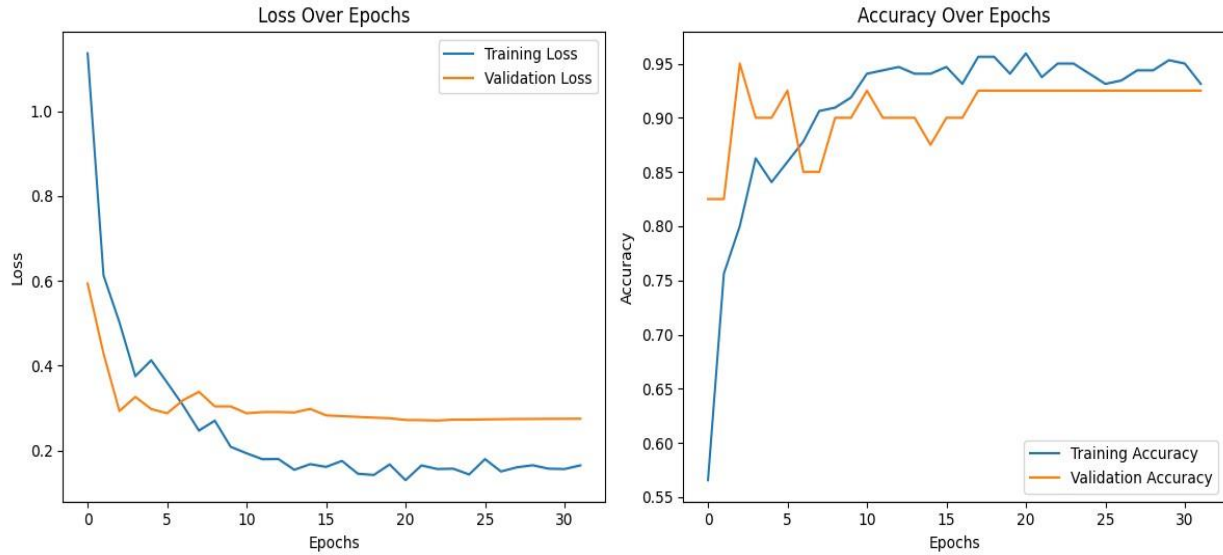


Fig. 4. Hybrid model performance success status and loss status for the MSCI dataset

Figure 4 presents the accuracy and loss graph of the MSCI dataset, which achieved the highest performance among the datasets with an accuracy rate of 92.50%. Examining the graphical trend of the loss values, the training loss shows some fluctuating increases at certain points but eventually decreases to around 0.15. Although the validation loss initially exhibits fluctuations, it gradually stabilizes and levels off around 0.25 after the 15th epoch. These results indicate that the model has a strong generalization capability, as reflected by the achieved accuracy and loss values. The training accuracy initially starts at approximately 57–58% and increases rapidly, surpassing 90% after 10 epochs. Following the 10th epoch, it remains between 90–95%, indicating high performance. The validation accuracy reaches around 95% in the early epochs and then stabilizes at approximately 92%, demonstrating the overall strong performance of the model and suggesting that overfitting is not evident.

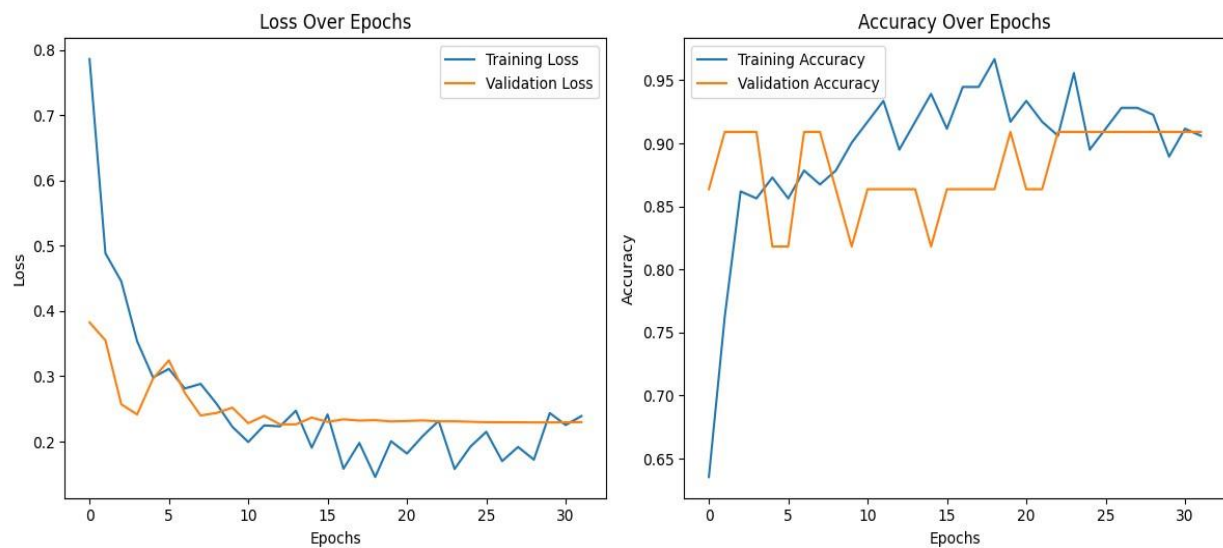


Fig. 5. Hybrid model performance success status and loss status for the MSLD dataset

Figure 5 shows the accuracy and loss graph of the MSLD dataset, which achieved the second-best performance among the datasets with an accuracy rate of 92.00%. The training loss starts at around 0.80 and decreases rapidly, reaching approximately 0.20. Similar to the MSC1 dataset, the validation loss gradually decreases and stabilizes around 0.25 after the 15th epoch. These results indicate that the model also performs well on this dataset, demonstrating strong generalization capability. The training accuracy initially ranges between approximately 60–65% and rapidly increases, surpassing 85% after the 5th epoch. After this point, the accuracy begins to fluctuate, continuing this pattern until the final epoch while maintaining a high-performance level between 90–95%. Validation accuracy initially reaches around 87% but then fluctuates, dropping to around 82%. After the 22nd or 23rd epoch, it stabilizes at 92%, indicating strong overall model performance and suggesting that overfitting is not present.

Figure 6 presents the accuracy and loss graph for the MSID dataset, which achieved the lowest performance among the datasets with an accuracy rate of 87.65%. Observing the graphical trend of the loss values, the training loss, despite showing some fluctuations at certain points, decreased to approximately 0.10–0.15. Although the validation loss initially exhibited a fluctuating pattern, it stabilized around 0.26 after the 5th epoch. These results suggest that, despite a slightly lower accuracy, the model still demonstrates a strong generalization capability. The training accuracy initially starts below 70% and increases rapidly, reaching around 87% by the 5th epoch. It then continues to rise with fluctuations until the final epoch, maintaining a high-performance level between 90–95%. The validation accuracy reaches approximately 92% in the early stages but slightly drops to around 90%, continuing with minor fluctuations. After the 20th epoch, it stabilizes at around 90%, indicating strong overall model performance and providing evidence that overfitting is not observed.

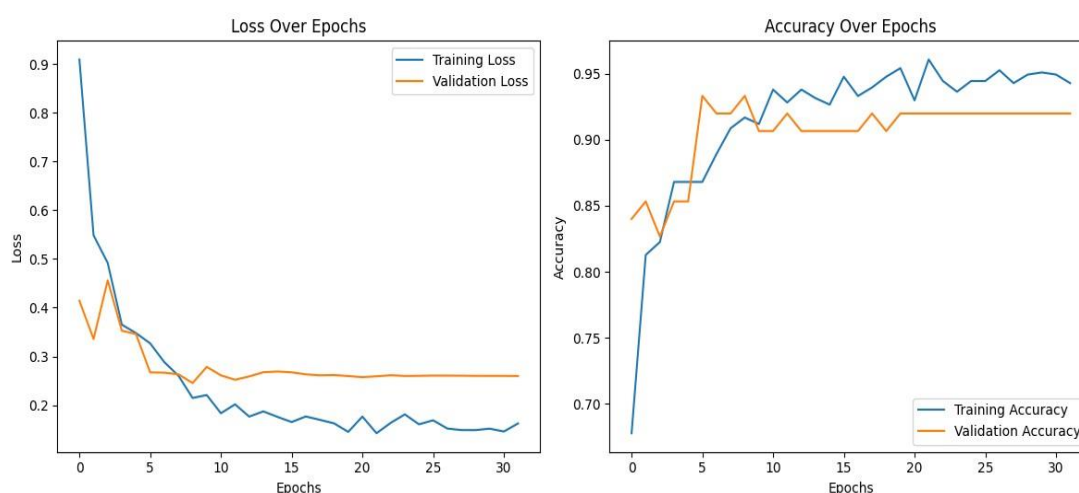


Fig. 6. Hybrid model performance success status and loss status for the MSID dataset

Table 5. Confusion matrix of the hybrid model for the overall performance on the MSLD dataset

		Predicted Class		
Actual Class		Monkeypox	Others	Total
	Monkeypox	11 (TP)	0 (FN)	11
	Others	2 (FP)	12 (TN)	14

Table 6. Confusion matrix of the hybrid model for the overall performance on the MCS1 dataset

		Predicted Class				
Actual Class		Acne	Chickenpox	Monkeypox	Normal	Total
	Acne	9 (TP)	1 (FN)	0	0	10
	Chickenpox	0	10 (TP)	0	0	10
	Monkeypox	0	2 (FP)	8 (TP)	0 (FN)	10
	Normal	0	0	0	10 (TP)	10

Table 7. Confusion matrix of the hybrid model for the overall performance on the MSID dataset

		Predicted Class				
Actual Class		Chickenpox	Measles	Monkeypox	Normal	Total
	Chickenpox	9 (TP)	0	3 (FN)	0	12
	Measles	1 (FN)	7 (TP)	1 (FN)	1 (FN)	10
	Monkeypox	2 (FN)	0	26 (TP)	1 (FN)	29
	Normal	0	0	1 (FN)	29 (TP)	30

The confusion matrices of the datasets used in the study are presented above. Table 5 shows the confusion matrix for the MSLD dataset, which includes two classes: Monkeypox and Others (comprising other skin diseases and healthy images). All samples in the Monkeypox class were correctly classified, indicating that the developed model performs exceptionally well in this category. In the Others class, 2 out of 12 samples were misclassified as Monkeypox. This misclassification may stem from visual similarities between certain skin conditions and Monkeypox. Overall, the model's ability to accurately detect Monkeypox confirms the effectiveness of the developed hybrid model. In Table 6, the confusion matrix for the MSCI dataset involves four classes: Acne, Chickenpox, Monkeypox, and Normal. The model accurately classified all samples in the Chickenpox and Normal classes, demonstrating strong performance in these categories. In the Acne class, one sample was misclassified, and in the Monkeypox class, two samples were confused with Chickenpox. This confusion may be attributed to visual similarities between different types of rashes. Overall, the model provides reliable predictions across all classes, particularly for Monkeypox detection. In Table 7, the confusion matrix for the MSID dataset includes four classes: Chickenpox, Measles, Monkeypox, and Normal (healthy). Within the Monkeypox class, 26 samples were correctly classified, and only 3 were misclassified into other classes, indicating robust model performance in this category. In the Normal class, only one sample was incorrectly labeled as Monkeypox. Some confusion was observed between the Chickenpox and Measles classes, likely due to visual resemblance. In general, the model achieves high accuracy across all classes and delivers dependable results, especially for identifying Monkeypox.

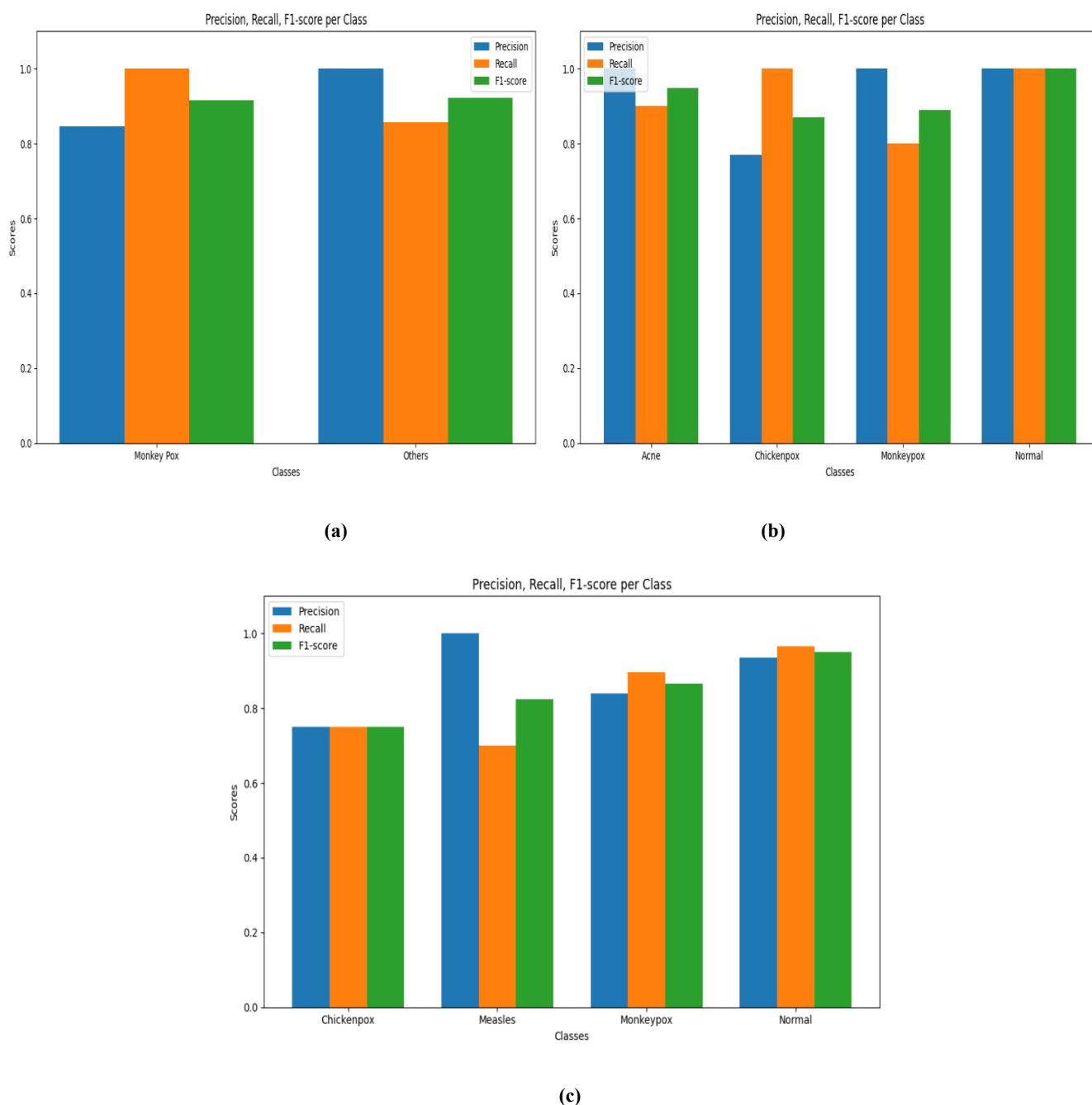


Fig. 7. Class-wise precision, recall, and f1-score values: (a) MSLD, (b) MSCI, (c) MSID

Figure 7 presents a comparative analysis of the model's performance on the classes within the used datasets using Precision, Recall, and F1-score metrics.

4. Conclusions

In this study, Monkeypox disease was detected with accuracy rates of 92.50%, 92.00%, and 87.65% on three different datasets, namely MSCI, MSLD, and MSID, respectively. The datasets used in the study consist of images representing various skin lesions, including Monkeypox, Chickenpox, Measles, Acne, and healthy skin. Upon analyzing the results obtained from the developed hybrid model, it was observed that factors such as class imbalance, diversity of classes, and visual similarities between the skin diseases in the datasets significantly influenced the accuracy rates. This indicates that even with the application of image processing techniques, diseases with similar visual characteristics—particularly clinically important conditions like Monkeypox—can still be misclassified. Therefore, it is crucial to enrich the datasets as much as possible and to continuously improve image processing methods. In this study, a hybrid architecture was developed by combining three different transfer learning models (NASNetMobile, ResNet50V2 and InceptionV3), and feature selection was applied using the mRMR (Minimum Redundancy Maximum Relevance) algorithm. mRMR reduced the number of features derived from the combined transfer learning models, ensuring that only the most meaningful and relevant features were included in the final model. This led to a simplified learning process and improved model performance. The highest accuracy rate, 92.50%, was achieved on the MSCI dataset, which includes four balanced classes with 100 images each. The balanced distribution of classes provided an advantage in terms of class representation and contributed to the higher accuracy achieved. In contrast, the other datasets contained a varying number of classes and imbalanced distributions, which led to comparatively lower performance. An analysis of the confusion matrices and performance graphs for the three datasets demonstrated that the model exhibited strong discriminative performance, particularly in identifying Monkeypox cases. Furthermore, the correct and systematic application of data augmentation techniques had a positive impact on the overall performance of the model. In conclusion, the developed hybrid model achieved high accuracy across all three datasets and delivered reliable and effective results, especially in the identification of Monkeypox disease. In this study, successful results were achieved by combining the strengths of different transfer learning architectures and selecting the most relevant features using the mRMR algorithm. The use of multiple datasets revealed that higher performance was obtained particularly in those with balanced class distributions, emphasizing the influence of image quality and class representation on model performance. The developed model enables accurate and rapid diagnosis, reducing the reliance on costly and time-consuming laboratory tests such as PCR. This is especially important in low-resource settings—such as regions in Africa with limited healthcare infrastructure—where early detection and timely intervention are critical.

The observed performance differences across datasets are primarily attributed to variations in content diversity and data distribution. While the limitations of the datasets led to decreased model performance in some real-world scenarios, the use of multiple datasets allowed the model to generalize well, even in the presence of imbalanced classes and visually similar disease categories. These contributions support the development of more efficient and interpretable diagnostic systems. This study demonstrates practical usability, especially in real-world clinical settings with limited resources. These contributions distinguish our work from existing studies and highlight its value as a robust and innovative tool for diagnosing Monkeypox and other visually similar skin diseases.

5. Limitations and Future Work

Although the proposed hybrid model demonstrated high classification performance across three different datasets, there are several limitations that should be addressed in future studies. The most critical limitation is the issue of class imbalance observed in some datasets (MSID and MSLD). In particular, classes with a small number of samples or those that are visually very similar to other skin lesions—such as Chickenpox and Monkeypox—made accurate classification more challenging. To mitigate this issue, advanced data augmentation techniques such as Generative Adversarial Networks (GANs), Autoencoder-based approaches, and Neural Style Transfer (NST) can be utilized. Another limitation of the study is the high computational cost of the hybrid architecture. This may hinder its deployment in low-resource environments with limited hardware capabilities. In future work, efforts will focus on increasing the computational efficiency of the model by exploring more lightweight architectures and optimizing the implementation environment. Moreover, integrating the model into real-world applications, including mobile health platforms, is also planned to enhance its accessibility and usability.

References

- [1] J. Zhang, F. Zhong, K. He, M. Ji, S. Li, and C. Li, "Recent advancements and perspectives in the diagnosis of skin diseases using machine learning and deep learning: A review," *Diagnostics*, vol. 13, no. 23, p. 3506, 2023.
- [2] M. Pal, P. Dave, and R. Mahendra, "Ebola hemorrhagic fever: An emerging highly contagious and fatal viral zoonosis," *Int. J. Multidiscip. Res.*, vol. 2, pp. 1–2, 2014.

- [3] M. N. Lessani, Z. Li, F. Jing, S. Qiao, J. Zhang, B. Olatosi, and X. Li, "Human mobility and the infectious disease transmission: a systematic review," *Geo-Spatial Inf. Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 1824–1851, 2024.
- [4] N. Berthet, S. Descorps-Declère, C. Besombes, M. Curaudeau, A. A. Nkili Meyong, B. Selekon, and E. Nakoune, "Genomic history of human monkeypox infections in the Central African Republic between 2001 and 2018," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Art. no. 13085, 2021.
- [5] R. P. Chauhan, R. Fogel, and J. Limson, "Overview of diagnostic methods, disease prevalence and transmission of MPOX (formerly monkeypox) in humans and animal reservoirs," *Microorganisms*, vol. 11, no. 5, p. 1186, 2023.
- [6] E. Alakunle, D. Kolawole, D. Diaz-Canova, F. Alele, O. Adegboye, U. Moens, and M. I. Okeke, "A comprehensive review of monkeypox virus and mpox characteristics," *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, vol. 14, Art. no. 1360586, 2024.
- [7] M. M. Islam, P. Dutta, R. Rashid, S. S. Jaffery, A. Islam, E. Farag, *et al.*, "Pathogenicity and virulence of monkeypox at the human-animal-ecology interface," *Virulence*, vol. 14, no. 1, p. 2186357, 2023.
- [8] H. Harapan, Y. Ophinni, D. Megawati, A. Frediansyah, S. S. Mamada, M. Salampe, *et al.*, "Monkeypox: A comprehensive review," *Viruses*, vol. 14, no. 10, p. 2155, 2022.
- [9] D. Hastari, S. Winanda, A. R. Pratama, N. Nurhaliza, and E. S. Ginting, "Application of Convolutional Neural Network ResNet-50 V2 on image classification of rice plant disease," *Public Res. J. Eng., Data Technol. Comput. Sci.*, vol. 1, no. 2, 2024.
- [10] S. Riyadi, F. A. Abidin, and N. Audita, "Comparison of ResNet50V2 and MobileNetV2 models in building architectural style classification," in *Proc. 2024 Int. Conf. Intelligent Syst. Comput. Vis. (ISCIV)*, May 2024, pp. 1–8.
- [11] E. Gupta, M. Gupta, R. A. Sachdeva, P. Handa, and N. Goel, "Automatic seizure detection using rhythmicity spectrograms and inception-v3 architecture," in *Proc. 2023 10th Int. Conf. Signal Process. Integr. Networks (SPIN)*, Mar. 2023, pp. 131–136.
- [12] X. Zhao, L. Wang, Y. Zhang, X. Han, M. Deveci, and M. Parmar, "A review of convolutional neural networks in computer vision," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 57, no. 4, p. 99, 2024.
- [13] İ. Aksoy and K. Adem, "Optimizing hyperparameters for enhanced performance in convolutional neural networks: A study using NASNetMobile and DenseNet201 models," *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 42–52, 2024.
- [14] A. O. Adedaja, P. A. Owolawi, T. Mapayi, and C. Tu, "Intelligent mobile plant disease diagnostic system using NASNet-mobile deep learning," *IAENG Int. J. Comput. Sci.*, vol. 49, no. 1, pp. 216–231, 2022.
- [15] K. Radhika, K. Devika, T. Aswathi, P. Sreevidya, V. Sowmya, and K. P. Soman, "Performance analysis of NASNet on unconstrained ear recognition," in *Nature Inspired Computing for Data Science*, pp. 57–82, 2020.
- [16] V. Yelleti and P. S. V. S. Sai Prasad, "mRMR Feature Selection to Handle High Dimensional Datasets: Vertical Partitioning Based Iterative MapReduce Framework," in *Intelligent Systems Design and Applications*, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1050, pp. 79–90, July 2024, doi: 10.1007/978-3-031-64847-2_7.
- [17] M. Altun, H. Gürüler, O. Özkaraca, F. Khan, J. Khan, and Y. Lee, "Monkeypox detection using CNN with transfer learning," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 1783, 2023.
- [18] O. Attallah, "MonDial-CAD: Monkeypox diagnosis via selected hybrid CNNs unified with feature selection and ensemble learning," *Digit. Health*, vol. 9, p. 20552076231180054, 2023.
- [19] S. U. R. Khan, S. Asif, O. Bilal, and S. Ali, "Deep hybrid model for Mpox disease diagnosis from skin lesion images," *Int. J. Imaging Syst. Technol.*, vol. 34, no. 2, p. e23044, 2024.
- [20] S. Asif, M. Zhao, F. Tang, Y. Zhu, and B. Zhao, "Metaheuristics optimization-based ensemble of deep neural networks for Mpox disease detection," *Neural Netw.*, vol. 167, pp. 342–359, 2023.
- [21] C. Sitaula and T. B. Shahi, "Monkeypox virus detection using pre-trained deep learning-based approaches," *J. Med. Syst.*, vol. 46, no. 11, p. 78, 2022.
- [22] H. H. Luong, N. H. Khang, N. Q. Le, D. M. Canh, and P. S. Ha, "A proposed approach for monkeypox classification," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 14, no. 8, 2023.
- [23] B. Gülmez, "MonkeypoxHybridNet: A hybrid deep convolutional neural network model for monkeypox disease detection," *Int. Res. Eng. Sci.*, vol. 3, pp. 49–64, 2022.
- [24] S. Rampogu, "A review on the use of machine learning techniques in monkeypox disease prediction," *Sci. One Health*, p. 100040, 2023.
- [25] A. I. Saleh and A. H. Rabie, "Human monkeypox diagnose (HMD) strategy based on data mining and artificial intelligence techniques," *Comput. Biol. Med.*, vol. 152, p. 106383, 2023.
- [26] F. Uysal, "Detection of monkeypox disease from human skin images with a hybrid deep learning model," *Diagnostics*, vol. 13, no. 10, p. 1772, 2023.
- [27] B. Tasci, "Ön eğitilmiş evrimsel sinir ağı modellerinde öznetelik seçim algoritmasını kullanarak cilt lezyon görüntülerinin sınıflandırılması," *Fırat Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 541–552, 2022.