



E-ISSN: 2547-958X

FMD

FEN VE MÜHENDİSLİK
ERGİSİ

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ FEN VE MÜHENDİSLİK DERGİSİ (FMD)
DOKUZ EYLUL UNIVERSITY ENGINEERING FACULTY JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING (JSE)

CİLT: 26
SAYI: 78
YIL: EYLÜL 2024

VOLUME: 26
ISSUE: 78
YEAR: SEPTEMBER
2024



MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK DERGİSİ
CİLT: 26. SAYI:78 YIL:2024
Elektronik ISSN: 2547-958X

Elektronik Dergi -2024

Dergi Sahibi: Dokuz Eylül Üniversitesi

Yayın Sahibi: Prof. Dr. Azize Ayol

Elektronik Yayın Yapan: DEÜ Mühendislik Fakültesi

Dergi İletişim Adresi: Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dekanlığı Tınaztepe Yerleşkesi, Adatepe Mah. Doğuş Cad. No: 207-1 / 35390 Buca-İZMİR.

Baş Editör:

Doç.Dr. Serkan EKER

Editörler Kurulu:

Prof. Dr. Gülseren KARABAY Tekstil Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Taner GÖKTAŞ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Prof. Dr. Tolga GÖNENÇ Jeofizik Mühendisliği Bölümü

Prof. Dr. A. Hamdi DELİORMANLI Maden Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Mustafa DOĞAN İnşaat Mühendisliği Bölümü

Prof. Dr. Yusuf ARMAN Makina Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Metin YURDDAŞKAL Metalurji ve Malzeme. Mühendisliği. Bölümü

Prof. Dr. Derya BİRANT Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Uğurcan ATMACA Havacılık ve Uzay Mühendisliği

Prof. Dr. Aylin ALIN Fen Fakültesi İstatistik Bölümü

Prof. Dr. Muhammed DENİZ Fen Fakültesi Fizik Bölümü

Doç. Dr. Burcu Silindir YANTIR Fen Fakültesi Matematik Bölümü

Doç. Dr. Mine ANTEP Fen Fakültesi Kimya Bölümü

Dr.Öğr. Üyesi Işıl ÖZCAN Amerikan Kültürü ve Edebiyatı Bölümü (Dil Editörü)

Teknik Editörler:

Dr.Öğr.Üyesi Celal Cem SARIOĞLU, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü

Arş.Gör. Meltem GÜLLÜSAÇ, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü

Dil Editörü:

Dr.Öğr. Üyesi Işıl ÖZCAN Amerikan Kültürü ve Edebiyatı Bölümü

Yayın Danışma Kurulu:

Dr Öğr Üye ÖMER AYDIN Manisa Celal Bayar Üniversitesi, TÜRKİYE

Dr Öğr Üye Enis KARAARSLAN Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Nuri AZBAR Ege Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Filiz DİLEK Orta Doğu Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Ayhan ALTINTAŞ Bilkent Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Cem CİVELEK Türk-Alman Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Gülçin FEYZİOĞLU Galatasaray Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ Konya Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Alper İLKI İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Dr. Harris VANGELIS National Technical University of Athens, GREECE

Prof. Dr. Bülent ORUÇ Kocaeli Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof.Dr.Anastasia KIRATZİ Aristotle University of Thessaloniki, GREECE

Prof.Dr.Despina KONTOPOULOU Aristotle University of Thessaloniki, GREECE

Prof.Dr.Gregory TSOKAS Aristotle University of Thessaloniki, GREECE

Prof.Dr. Ivana VASIJEVIĆ University of Belgrade, SERBIA

Prof. Dr. Osman CANDAN Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Gültekin TARCAN Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Can GENÇ İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Şebnem DÜZGÜN Colorado School of Mines,USD

Prof. Dr. Serkan SAYDAM The University of New South Wales, AUSTRALIA

Prof. Dr. Cengiz KUZU İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Doç. Dr. Mehmet Sıddık KIZIL The University of Queensland, AUSTRALIA

Prof. Dr. Binnur Gönen KIRAL Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Hasan ÖZTÜRK Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Gürel ÇAM İskenderun Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Hakan GAŞAN Osmangazi Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Merih SARIŞIK Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Cevza CANDAN İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Dr. Öğr. Üyesi Hediye ATIK Atılım Üniversitesi, TÜRKİYE

Dr. Öğr. Üyesi Sedat TOKGÖZ Gebze Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Dr. Serpil ŞAKIROĞLU Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Doç. Dr. Ümit AKINCI Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Prof. Lin Shin TED Sichuan University, CHINA

Prof. Dr. Mieczyslaw CICHON Adam Mickiewicz University, POLAND

Prof. Dr. Selçuk DEMİR Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

Elektronik erişim adresi

DergiPark Akademik adresi: <https://dergipark.org.tr/pub/deumffmd>

Dergide yayımlanan makalelerin bilimsel içerik ve dil sorumluluğu yazarlara aittir.

Dergide yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden kullanılamaz.



CAN Data Transfer from Vehicle to Cloud via Smartphone

Araçtan Buluta Akıllı Telefon ile CAN Veri Aktarımı

Serhat Oldaç^{1*}, Yavuz Şenol²

¹ Department of Mechatronics Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylül University, 35390, İzmir, TÜRKİYE

² Department of Electrical and Electronics Engineering, Engineering Faculty, Dokuz Eylül University, 35390 İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: serhat.oldac@ogr.deu.edu.tr

Abstract

Smartphones have evolved into multipurpose handheld devices and have exceeded their limits beyond communication. Apart from communication, these devices have been utilized for mobile payment, cloud-based services, artificial intelligence, Internet of Things (IoT) applications, and more. In this study, an Arduino-based system has been developed to receive commercial heavy-duty vehicle data in accordance with the SAE J1939 standard through the On Board Diagnosis II (OBD-II) connection. In addition, a smartphone application supported by graphical interface has been created to transmit processed data to the cloud. The designed system has been tested and verified by using data from an internal combustion engine passenger bus. The reliable transfer of selected data has been realized in both the smartphone and cloud environments. This study has offered a cost-effective solution for transmitting J1939 standardized vehicle data to a remote operator via a smartphone based on verified successful applications. Moreover, the created system will be a good significant resource for comparison to future applications.

Keywords: Telematics, Intelligent Transportation Systems, Connectivity, Internet of Things, Mobile Systems, Wireless Monitoring

Öz

Akıllı telefonlar çok amaçlı elde taşınan cihazlara dönüşmüş ve iletişimin ötesinde sınırlarını aşmıştır. İletişim dışında, bu cihazlar mobil ödeme, bulut tabanlı hizmetler, yapay zeka, Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamaları ve daha fazlası için kullanılmıştır. Bu çalışmada, SAE J1939 standardına uygun ticari ağır vasıta verilerini On Board Diagnosis II (OBD-II) bağlantısı üzerinden almak için Arduino tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. Ayrıca, işlenen verilerin buluta iletilmesi için grafik arayüz destekli akıllı telefon uygulaması oluşturulmuştur. Tasarlanan sistem, içten yanmalı motorlu bir yolcu otobüsünden alınan veriler kullanılarak test edilmiş ve doğrulanmıştır. Seçilen verilerin güvenilir aktarımı hem akıllı telefon hem de bulut ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, doğrulanmış başarılı uygulamalara dayalı olarak, J1939 standartlaştırılmış araç verilerinin bir akıllı telefon aracılığıyla uzaktaki bir operatöre iletilmesi için uygun maliyetli bir çözüm sunmuştur. Ayrıca, oluşturulan sistem, gelecekteki uygulamalarla karşılaştırma için önemli bir kaynak olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Telematik, Akıllı Ulaşım Sistemleri, Bağlanabilirlik, Nesnelerin İnterneti, Mobil Sistemler, Kablosuz İzleme

1. Introduction

The widespread adoption of smartphones in society has expanded their usage beyond voice communication to include a diverse range of applications, such as social media, online gaming, business tools, live traffic mapping with GPS, and more. Consequently, smartphones are now often connected to remote servers or clouds to facilitate the seamless functioning of these applications. Moreover, as an IoT device they are integrated with other smart devices with support of wireless technologies, NFC, GSM, Bluetooth, Wi-Fi, and GPS. For these reasons, some smartphones have even more RAM capacity than computers and CPUs have been improved considerably. Many different studies are targeting to take advantage of today's current mobile technology by applying different methodologies and this study has been inspired by this fact. The telematics industry mainly covers information, communication, automotive electronics, and digital content technology applications. The telematics industry is used in many applications such as GPS satellite positioning, call center, CAN bus vehicle data, general anti-theft security for

vehicles and personnel, emergency rescue and road guidance, route planning, driving behavior analysis, etc. [1].

On the other hand, the automotive industry is witnessing a rapid growth in the development of autonomous driving and advanced driver assistance systems, which are interconnected with the same Controller Area Network (CAN) bus through connectivity devices. This has led the automotive society to prioritize solutions that prevent cyber threats and their potential impact on human life. In addition, governments have highlighted the significance of cybersecurity by issuing regulations and guidelines [2]. Although security is not a focus of this study, it remains a crucial aspect that requires attention in the development and implementation of automotive technologies.

Zaldivar, J, et al. developed an accident detection system on the basis of airbag-triggered and deceleration detection [3]. Parametrically, selectable in real-time sensor data is transferred to an android-based smartphone visual interface via the ELM327 Bluetooth device through the OBD-II channel.

In this way, they aimed to automatically call the necessary emergency numbers and send the location of the accident. Similarly, Sawant, P. R. et al. presented a cost-effective solution for taxi company owners to analyze the driving characteristics of their drivers, where the vehicle data is transferred from the OBD-II device to the server with the help of a smartphone and recorded in the database [4]. The vehicle data is transferred from the OBD-II device to the server with the help of a smartphone and recorded in the database. They don't intend only for the driver, passenger, and vehicle safety but also to analyze driving characteristics and develop efficient driving techniques. Prasad B.V.P. et al. developed a diagnostic device that reads SAE J1939 vehicle data and transmits it to the LCD display and to the phone via Bluetooth [5]. The Renesas RL78 MCU was used as a J1939 monitoring device and the Vector CANoe simulator was used as a simulation device. Some vehicle data such as engine coolant temperature, torque value, intake manifold pressure value, etc. is visually displayed on the LCD screen. The study did not develop smartphone applications and transfer data to the server or cloud but it can be expanded. Rodríguez, A. R. et al. designed an Arduino-based real-time OBD-II scanner device for diagnostic purposes [6]. The filtered and masked CAN bus messages were transferred via USB to a local computer and the values can be displayed visually. Palomino et al. developed a datalogger that scans many parameters from the OBD-II connector in an affordable way [7]. Arduino Nano, MCP2515, microSD slot, LCD Screen, and open source codes and libraries were implemented. But the scope of the study did not include the transfer of vehicle data to the smartphone or cloud.

In this study, an alternative telemetry methodology is proposed and an affordable electronic device is prototyped, realized, and tested. Thus, it can reduce the dependency on expensive GSM modules and monthly subscribed sim cards used in the conventional telemetry device. Unlike most academic research topics that focus on localized diagnostic purposes, this study offers a distinct approach by providing consecutive communication protocols and comprehensive software to ensure reliable data flow between units. Therefore, our intelligent methodology not only serves as a diagnostic tool but also enables the transmission of selectable vehicle data to cloud.

2. System Overview

2.1. Vehicle Side

Modern internal combustion engine HD vehicles are equipped with several Electronic Control Units (ECU) that coordinate and monitor internal components and devices, communicating via one or more vehicle network buses, for example, powertrain CAN bus. Control units can communicate with each other at high speed and work more synchronized. An example of this can be seen in the Figure 1, all ECUs which relays information to the vehicle's instrument display via two wires. This information includes vehicle speed, engine temperature, engine speed, current gear, brake pad status, signal indicators, fault warnings, and trip computer data etc., all of which are displayed to the vehicle user in a matter of microseconds.

OBD-II connector provides access to the vehicle to the CAN bus network as an extended standard SAE J1939. There are a large number of devices designed using J1939 protocols to monitor the vehicle data network through OBD-II by various companies [8]. This standard provides a standard protocol independent of manufacturers. The vehicle controller, Engine, Transmission, ADAS, Brake, etc. units have CAN transceivers connected at pins 6 and 14 of the OBD-II socket. The data primarily begins with the OBD-II port and is transferred to the Google sheet document by

various communication protocols utilized in this transfer process.

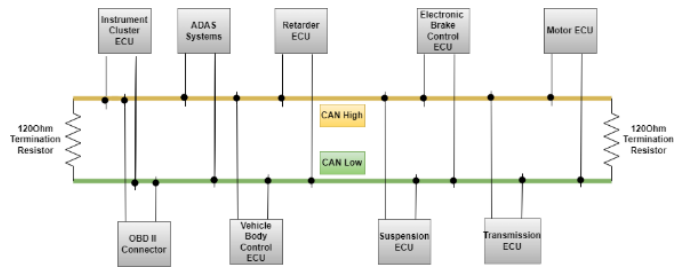


Figure 1. Heavy Duty vehicle powertrain CAN bus diagram.

SAE J1939 is a standardized and high-level protocol that runs on CAN (ISO 11898). J1939 is widely used in industrial diesel engines designed for heavy vehicles, highway vehicles, agricultural vehicles, highway equipment, construction equipment, and other vehicles. SAE released several documents consisting of standards for the automotive industry to provide identical and robust communication between the ECUs in the vehicle with uncomplicated diagnostic capabilities. As can be observed from Figure 2, the J1939 OSI reference model provides a perspective in which each guideline outlines the specific requirements for different layers. It is through adherence to this protocol that ECUs are able to effectively communicate with one another.

Documents of SAE J1939 Standard		Layers of OSI Reference Model
J1939/71	J1939/01 J1939/81	Application
J1939/73		Presentation
		Session
J1939/21		Transport
J1939/31		Network
J1939/21		Data Link
J1939/11 J1939/12 J1939/14 J1939/15		Physical

Figure 2. J1939 OSI reference model.

The current heavy-duty vehicles support a CAN 2.0B bitrate of up to 1 Mbit/sec in the physical and data link layer [9], whereas the communication speed utilized in our study is 250 Kbit/sec. Figure 3 illustrates the structure of the data frame that consists of 11bits standard originally, but can also be extended to 29 bits, which is called an extended format. The Start of Frame (SOF) marks the initialization of a frame. The arbitration field encapsulates a CAN identifier and a Remote Transmission Request (RTR) bit that indicates if the message is a remote application. The 4 bits are reserved for Data Length Code (DLC) which presents the length of the data in the control field. To ensure the integrity of the received message, a Cyclic Redundancy Check (CRC) sequence is included in the CRC field. The Acknowledge slot (ACK) field confirms that the transmitted message has been received successfully by at least one of the nodes [10]. This system provided a flexible structure for designers in defining name structure. In this case, new controllers can be implemented in both available formats and utilized commercially in the current automotive market [11].

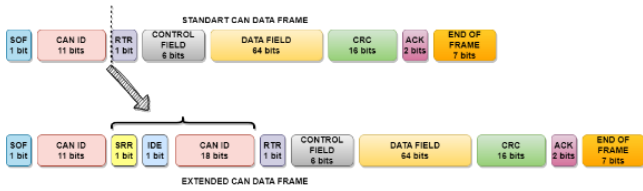


Figure 3. CAN data frame structure.

The CANalyzer software tool, developed by Vector Informatik GmbH, has established itself as a prominent choice for the automotive industry's CAN dataflow analysis needs, particularly in the context of serial line analysis. The software boasts a diverse range of features, including graphical data visualization, computer data recording capabilities, historical data simulation via the replay block, and the ability to send CAN messages to the line with function blocks, or programmable responsiveness via CAPL to facilitate the data streaming between the field and computer, the VN1630A interface device, equipped with both CAN and LIN transceivers, is utilized [12].

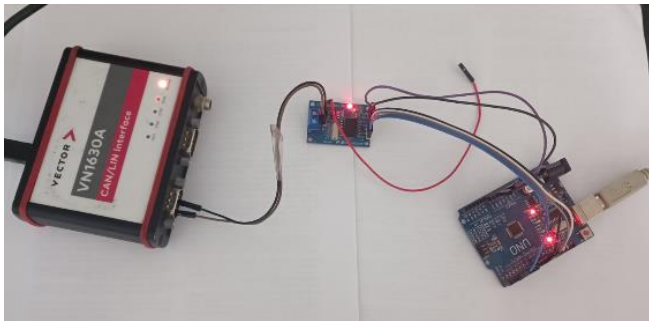


Figure 4. Test environment with VN1630A CANalyzer device.

In our study, we obtained a CAN log text file during a 3-hour city-bus drive in Izmir using the VN1630A device. As shown in Figure 4, the stored data file was subsequently employed to simulate historical data and exercise hardware and software units, thus demonstrating the utility and versatility of the CANalyzer tool in a practical setting.

The real-time recording of messages on the bus line is performed with a precision of one microsecond, and it even provides statistics on the number of frames and busload information interface. When the J1939 database file in .dbc format is imported, the acronyms specified in the SAE J1939/71 Vehicle Application Layer can be seen in the name column in Figure 5. J1939 PGN (Parameter Group Number) is a numerical identifier used in the J1939 protocol to group messages with the same destination and purpose. It consists of 18 bits, with the first 8 bits indicating the priority of the message and the remaining 10 bits indicating the PGN value. J1939 SPN (Suspect Parameter Number) is a unique identifier used to represent individual parameters within a J1939 PGN. For example, TSC1 is referring to Torque Speed Control 1. PGN of this message is zero '0' and possess the highest priority on the line since CAN bus has dominant low side and recessive high side communication structure [13]. ECUs of the driveline transmit TSC1 message to limit the engine torque and speed.

Time	Chn	ID	Name	Event Type	Dir	D..	D..	Data
0:00:00.000								
3.059...	CA...	CF00...	EEC2	CAN Frame	Tx	8	8	01 00 00 FF FF FF 7C 7D
3.060...	CA...	18F0...	VDC2	CAN Frame	Tx	8	8	58 7A FF FF FF FF FF 7D
3.060...	CA...	CF00...	E01	CAN Frame	Tx	8	8	F0 FF FF FF FF FF FF FF
3.063...	CA...	1CE8...	TFDT	CAN Frame	Tx	8	8	61 C4 FF 15 F0 FF 01 12
3.064...	CA...	CF03...	EAS1	CAN Frame	Tx	8	8	C9 03 FF FF FF FF FF FF
3.065...	CA...	1CFE...	E11	CAN Frame	Tx	8	8	FF AC 7D FF 04 00 00 00
3.065...	CA...	18FE...	AMB_H21	CAN Frame	Tx	8	8	C8 FF FF 79 24 44 FF FF
3.066...	CA...	C001...	TSC1	CAN Frame	Tx	8	8	30 FF FF 7D FF FF FF 04
3.066...	CA...	CF00...	ETC1	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 FF FF 00 00 FF
3.067...	CA...	18F0...	AT11G1	CAN Frame	Tx	8	8	FF FF FF FA FF FF FF FF
3.067...	CA...	18FE...	ETC7	CAN Frame	Tx	8	8	3F DC FF FF FF FF FF FF
3.068...	CA...	CF00...	ETC8	CAN Frame	Tx	8	8	E8 03 00 00 FF FF FF FF
3.069...	CA...	18F0...	ETC2	CAN Frame	Tx	8	8	7D 00 00 7D 20 4E 20 4E
3.069...	CA...	CF00...	EGF1	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 00 FF FF FF FF
3.070...	CA...	18F0...	ERC1	CAN Frame	Tx	8	8	F0 7D 7D FF 10 19 FA 7D
3.070...	CA...	18F0...	VDC2	CAN Frame	Tx	8	8	58 7A FF FF FF FF FF 7D
3.071...	CA...	18F0...	EEC7	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 FF FF FF FF FF FF
3.071...	CA...	8FE6...	HRV	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 00 00 00 00 00
3.072...	CA...	CF00...	EEC1	CAN Frame	Tx	8	8	0E 7D 00 00 00 00 0F 7D
3.073...	CA...	18FE...	AUX001	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 00 00 00 00 00
3.073...	CA...	C000...	TSC1	CAN Frame	Tx	8	8	EC F8 FA FA FF FF FF 26
3.074...	CA...	18FE...	EEC3	CAN Frame	Tx	8	8	7D A0 28 7D 7D FF FF 7D
3.074...	CA...	CF00...	EEC2	CAN Frame	Tx	8	8	01 00 00 FF FF FF FF 7C 7D
3.075...	CA...	C000...	TSC1	CAN Frame	Tx	8	8	30 FF FF 7D FF FF FF 74
3.076...	CA...	CF00...	ETC1	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 FF FF 00 00 FF
3.076...	CA...	CF00...	TSC1	CAN Frame	Tx	8	8	EC F8 FA FA FF FF FF 3F
3.078...	CA...	FF01...		CAN Frame	Tx	8	8	00 7D 00 00 7D 00 FF FF
3.079...	CA...	18F0...	AT10G1	CAN Frame	Tx	8	8	FF FF FF FA FF FF FF FF
3.080...	CA...	FF02...		CAN Frame	Tx	8	8	FF FF FF FF FF FF FF FF
3.080...	CA...	18F0...	VDC2	CAN Frame	Tx	8	8	58 7A FF FF FF FF FF 7D
3.081...	CA...	FF03...	Prop003	CAN Frame	Tx	8	8	10 A0 00 00 FF FF 00 80
3.083...	CA...	CF03...	EAS1	CAN Frame	Tx	8	8	C9 03 FF FF FF FF FF FF
3.084...	CA...	18FC...	E12	CAN Frame	Tx	8	8	0A 00 FF FF FF FF FF FF
3.085...	CA...	CF00...	ETC1	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 FF FF 00 00 FF
3.086...	CA...	CF00...	ETC8	CAN Frame	Tx	8	8	E8 03 00 00 FF FF FF FF
3.087...	CA...	C000...	TSC1	CAN Frame	Tx	8	8	EC F8 FA FA FF FF FF 30
3.089...	CA...	18FE...	ET2	CAN Frame	Tx	8	8	FF FF FF FF FF FF FF 25
3.090...	CA...	18F0...	VDC2	CAN Frame	Tx	8	8	58 7A FF FF FF FF FF 7D
3.090...	CA...	10F0...	TFAC	CAN Frame	Tx	8	8	09 01 FF FF 00 00 FF FF
3.091...	CA...	CF00...	EEC1	CAN Frame	Tx	8	8	0E 7D 00 00 00 00 0F 7D
3.091...	CA...	8FE6...	HRV	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 00 00 00 00 00
3.093...	CA...	18F0...	EEC1	CAN Frame	Tx	8	8	FF FF FF FF FF FF FF FF
3.094...	CA...	CD2...	ASC2_BMC	CAN Frame	Tx	8	8	03 11 FF FF FF FF FF FF
3.095...	CA...	18FE...	AUX001	CAN Frame	Tx	8	8	FC 3F FF FF FF FF FF FF
3.095...	CA...	18FE...	EEC3	CAN Frame	Tx	8	8	7D A0 28 7D 7D FF FF 7D
3.096...	CA...	CFE6...	TC01	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 00 C1 00 FE 00 00
3.096...	CA...	CF00...	ETC1	CAN Frame	Tx	8	8	00 00 FF FF 00 00 FF FF

Figure 5. Trace section interface on CANalyzer tool.

2.2. Hardware Configuration and Integration

Arduino has grown in popularity in recent years as it has its own integrated development environment (IDE), integrates many libraries, and is easy to use for professionals or hobbyists. Arduino Uno was selected as a microcontroller, MCP2515 as a CAN bus transceiver, and HC05 as Bluetooth modules were selected to scan vehicle data through the OBD-II port. A smartphone application compatible with both Android and iOS operating systems has been developed with the MIT APP inventor II environment, to receive vehicle data and transmit it to Google sheets as a log text file. Figure 6 indicates a general system overview from a high-level perspective.

The MCP2515 Module serves as a controller with a high-speed CAN transceiver, facilitating communication between the MCP2515 and Arduino via the Serial Peripheral Interface (SPI) protocol [14]. Unlike the Inter-Integrated Circuit (I2C) protocol, the SPI protocol's data lines are unidirectional, and peripheral devices (slaves) do not require addresses. Instead, each peripheral device has a select leg, called Slave Select (SS), whose number is equal to the number of peripheral devices used. Each device has a separate SS pin connected to the master device, and the peripheral device whose SS line is at a low (0 volts) level begins communication with the master device. The MCP2515 acts as a data link layer in the communication system's OSI layers, generating the message frame, performing (arbitration/prioritization), and monitoring the bus state (idle/occupied). It also performs bit timing and synchronization, message validation, acknowledgment, and error detection, and decides which message to forward or reject [15].

The motivation for choosing Bluetooth for local communication in our study is that it has very low cost and high-dimensional data transmission, and most importantly, it allows real-time data transfer since we will perform high-speed communication [16].

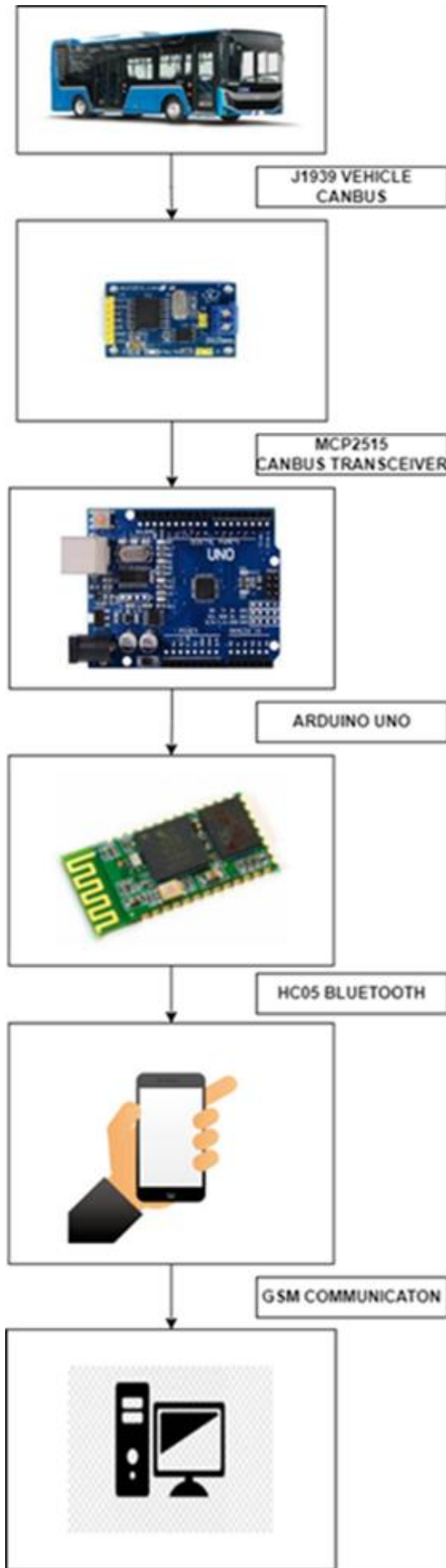


Figure 6. General system overview.

The HC-05 Bluetooth module is a popular Bluetooth serial adapter that provides a simple way to add Bluetooth functionality to microcontrollers. It uses a UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) interface to communicate with the microcontroller and supports a wide range of baud rates [17]. To configure the module, the user can enter AT commands through a terminal emulator or a microcontroller such as Arduino. HC05 Bluetooth module connects with Arduino via Tx/Rx protocol. Rx stands for "Receive" and Tx stands for "Transmit". Initially, the module should be configured by AT command mode to adjust the correct baud rate. The HC-05 can communicate in two ways as full-duplex. As depicted in Figure 7, SPI and UART connections were established between the electronics components provide communication data flow.

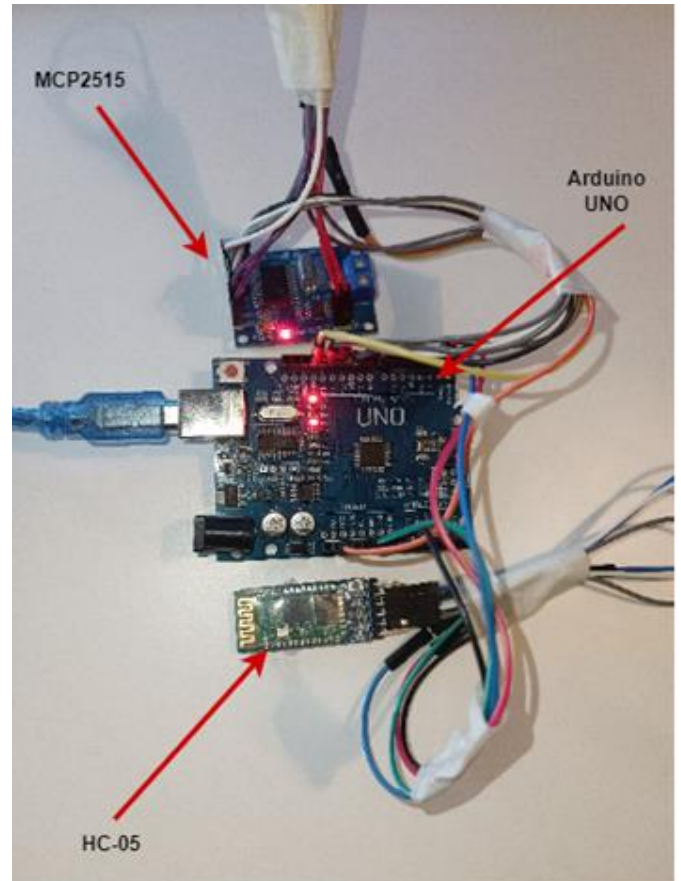


Figure 7. Hardware connections.

2.3. Software Development and Implementation

In the development of the software for data transmission to the cloud, two distinct platforms were utilized to ensure faultless integration and data communication. The Arduino software was implemented at the lowest level using the Arduino IDE environment, while the smartphone application was built using the MIT App Inventor II, a platform that has gained significant attention in academic circles. The Arduino software was designed with two primary methods, namely scanning, filtering, and converting standard or extended raw messages to actual values according to the Society of Automotive Engineers (SAE) instructions. Figure 8 provides a clear representation of the underlying communication infrastructure of the system at detailed. The diagram serves as an essential tool for visualizing the intricate interconnections and information flows between the various system components, thereby facilitating a deeper understanding of the system's functionality and performance. By mapping out the communication pathways and channels, the

diagram enables developers and engineers to identify potential bottlenecks and areas for improvement, leading to enhanced system efficiency and reliability. Overall, the communication flow diagram is a valuable asset in the design, implementation, and optimization of complex communication systems.

The Arduino software comprises two primary sections referred to as setup and loop. The setup section comprises initialization codes and functions that are executed once at the first start-up, while the loop section consists of codes that run continuously in real-time cycling. In other sections, various definitions, variables, libraries, and macros can be defined to ensure optimal performance. To interact with the transceiver and retrieve data from the buffer memory the SPI library was imported, and while the MCP2515 Integrated Circuit library set of functions was implemented to enable an Arduino board to communicate with the MCP2515 CAN transceiver chip via the Serial Peripheral Interface (SPI) bus [18]. The development process of the software was focused on achieving efficient data transmission to the cloud and maintaining compatibility between the Arduino and smartphone systems.

The Setup section of the program includes several important functions that are responsible for initializing the system and configuring various hardware components. These functions include "Timer_initialize()", which sets up the system timer and other timing related parameters; "Serial_port_configuration()", which configures the serial communication ports used for transmitting and receiving data; and "CAN_configuration()", which initializes the CAN bus interface and sets up the necessary communication parameters. These functions are critical for ensuring proper operation of the system and must be called before any other functions are executed. In the loop section, the software initially begins by scanning the CAN bus line to check for any message presence. The buffer reader methods are created to receive information regarding the Data Length Code (DLC) and the message content, which can be extended, standard, remote, or error message [19]. These values are merged with the J1939/71 application layer directives using a method that transforms the raw values into actual values. Subsequently, the required data is transmitted according to the information selected by the user from the mobile application.

MIT App Inventor II is an open-source web application originally created by Google and later supported by the Massachusetts Institute of Technology (MIT) [20].

In accordance with Figure 9, MIT App Inventor II provides a user-friendly environment for developing smartphone applications without requiring advanced programming skills. The platform offers a wide range of pre-built blocks and widgets, including buttons, text fields, and sensors, that can be easily dragged and dropped onto the design canvas to create a visual interface [21, 22]. These blocks can be customized using a simple graphical interface, allowing users to modify their behavior and appearance. This approach saves time and effort, as developer can create complex applications without the need for complex coding [23].

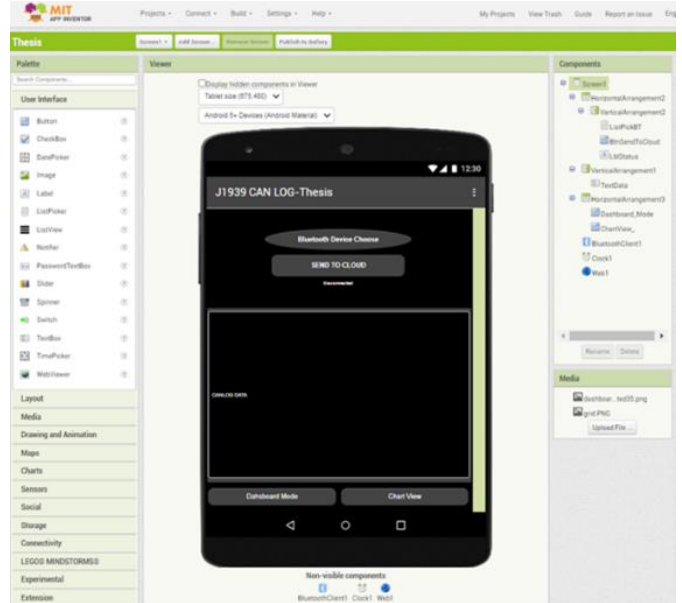


Figure 9. MIT App Inventor II application interface.

Proposed phone application presents the vehicle data to the user in a clear and easy-to-understand format. The application retrieves data from the Arduino through Bluetooth and displays it in a visually appealing format. The user can choose to view the raw data in one text field or select specific data based on J1939 PGN and SPN numbers. Together, PGNs and SPNs provide a standardized way to transmit and interpret data across a wide range of heavy-duty vehicles and equipment, enabling efficient and accurate communication between different systems and components. SPNs provide a standardized way to define and report data related to various vehicle systems and functions, such

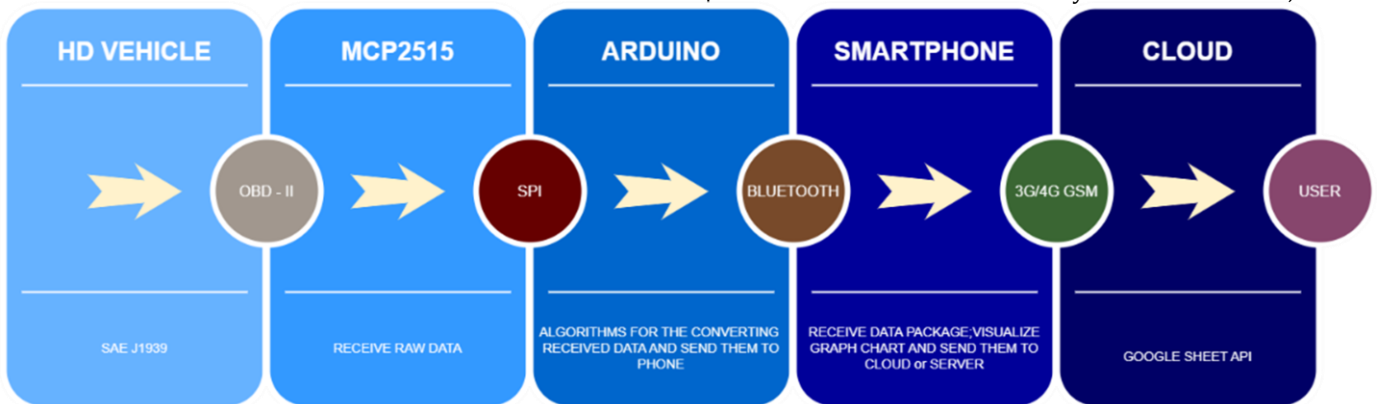


Figure 8. Data flow diagram.

as engine speed, coolant temperature, or fuel level. As evidenced by the screenshot presented in Figure 10, Each SPN is associated with a data length and resolution, allowing for consistent interpretation of the data across different vehicle systems and manufacturers. Additionally, the application can be customized to include a driver instrument panel display, which can provide real-time feedback on critical vehicle parameters such as speed, fuel level, and engine temperature etc. This type of visual display can be very useful for drivers, allowing them to monitor the vehicle's status more easily and make informed decisions about their driving behavior. Notwithstanding regulatory conditions, it is worth noting that the presence of undefined messages cannot be completely ruled out. Owing to the rapid pace of technological advancements, documentation efforts can occasionally fall behind, and in electric vehicles, it is not uncommon to encounter battery management systems that feature messages lacking clear SPN definitions. In such cases, the message can be chosen by entering values such as ID, data content, and cycle time. This approach leads to an increase in functionality.

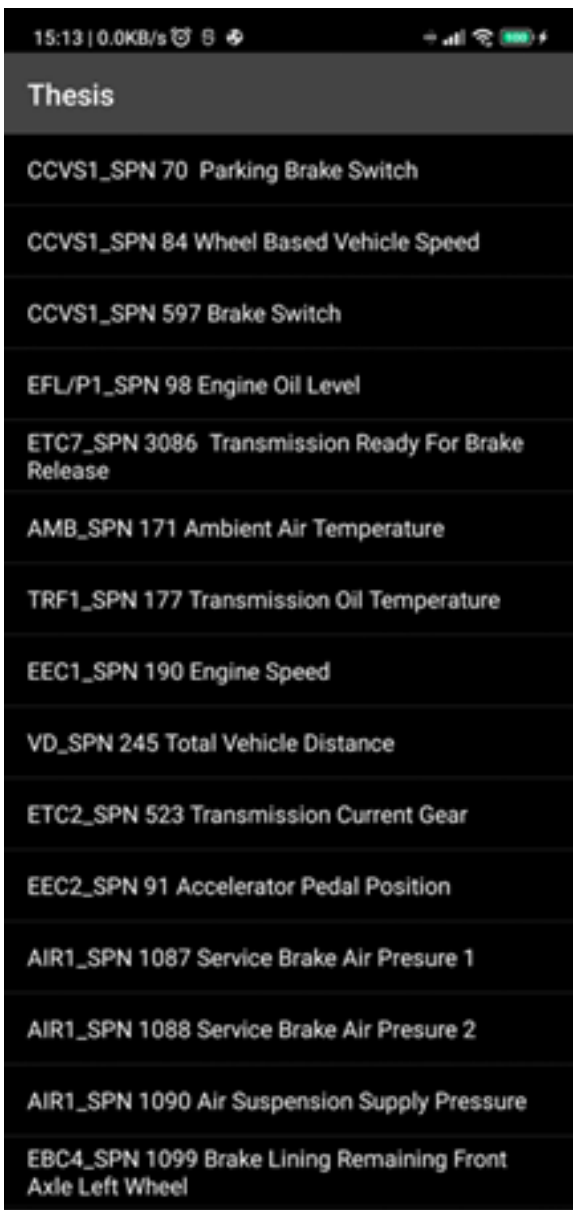


Figure 10. SPN data selection page in smartphone application.

A significant part of the system is about reading, transmitting, storing, and sharing user data from the moving vehicle on the google sheet to the remote client. This particular application can improve safety on the road as we can identify the vehicle and the driver's ability in relation to the road. In other aspects, the driver is informed that such a malfunction may occur. For example, the coolant temperature may increase rapidly due to the car stopping before engine failure and the driver may be signaled by the phone [24]. As depicted in Figure 11, the captured data can be stored in two different formats: a graphical representation or a message format.

Google Apps Script is a language used in the cloud for creating and enhancing cloud based applications. Developers can use it to make scripts that interact with various Google services, including Google Sheets, to automate tasks such as data entry, extraction, and analysis. When used in mobile application development, Apps Script can act as an intermediary between the mobile application and the target Google Sheets document [25].

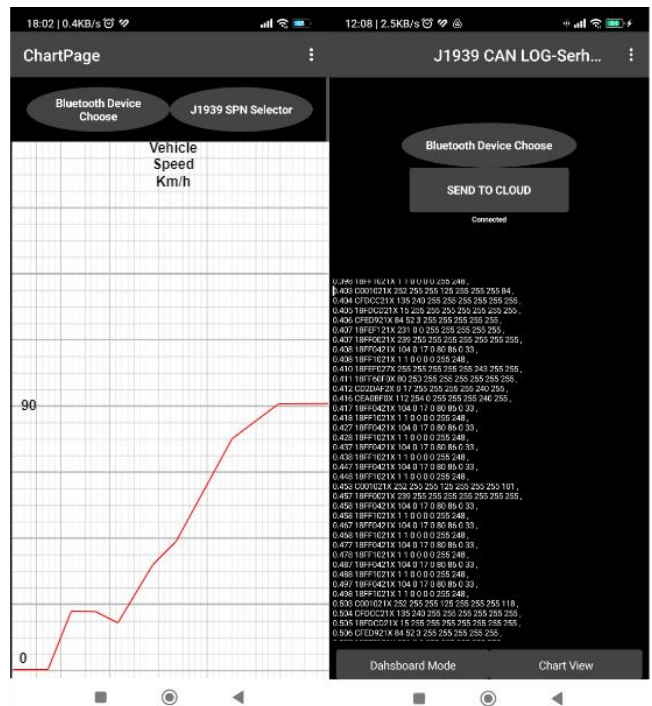


Figure 11. Chart view and CAN-Log record page.

The web app created by the script can receive data from the mobile app and then insert or update the data in the target document using the Google Sheets API. This method ensures secure and efficient data transfer as the data is processed and stored in the cloud and can be accessed from anywhere with an internet connection [26]. However, it is important to ensure that the web app and mobile application are authenticated and authorized to access the target Google Sheets document and have appropriate mechanisms in place for data validation and error handling to prevent data loss or corruption. The proposed software has ability to store data on Google Sheets allows for easy sharing and collaboration with multiple parties. It provides a convenient way for users to access and analyze data from anywhere at any time. The data can also be exported in various formats such as Word, Excel, csv, txt, etc., for further analysis or reporting. Apps Script is a language used in the cloud for creating and enhancing cloud-based applications. Developers can use it to make scripts that interact with various Google services, including Google Sheets, to automate tasks such as data entry, extraction, and analysis. When used in mobile application development,

Apps Script can act as an intermediary between the mobile application and the target Google Sheets document. The web app created by the script can receive data from the mobile app and then insert or update the data in the target document using the Google Sheets API. This method ensures secure and efficient data transfer as the data is processed and stored in the cloud and can be accessed from anywhere with an internet connection. However, it is important to ensure that the web app and mobile application are authenticated and authorized to access the target Google Sheets document and have appropriate mechanisms in place for data validation and error handling to prevent data loss or corruption. The proposed software has ability to store data on Google Sheets allows for easy sharing and collaboration with multiple parties. It provides a convenient way for users to access and analyze data from anywhere at any time. The data can also be exported in various formats such as CSV, Word, Txt or Excel for further analysis or reporting.

Figure 12 indicates a basic Google Apps Script function that can be used to add a user's name to a specific sheet in a Google Sheets document. The function has two parts: doGet and doPost, which are triggered when the script is accessed using the respective HTTP method [27]. The script then opens the Google Sheets document, selects a specific sheet within the document, and calls the addUser function to add the user's name to the sheet. The user's name is passed as a parameter called "ad" in the HTTP request. Finally, the addUser function appends a new row to the sheet with the user's name.

3. Discussion

The usage of ELM327 OBD-II Bluetooth device in telemetry applications in the automotive society, along with the integration of smartphones in respect of data collection and analysis, has been extensively studied in various academic works [28-35]. It is noteworthy that the ELM327 OBD tool is not inherently compatible with the SAE J1939 protocol as its intended use is for the OBD-II protocol.

Due to its inflexible structure, instead of using this device, we have integrated our microcontroller and transceiver in a self-built structure where we created embedded software to obtain data in a flexible manner.

```
function doGet(e) {
  var ss = SpreadsheetApp.openByUrl("https://docs.google.com/spreadsheets/d/1S1rRUU0AAGqVJEZq1Ff26nJ8F16mK1sXm4d3Z1vaayU/edit#gid=0");
  var sheet = ss.getSheetByName("Sayfa1");
  addUser(e, sheet);
}

function doPost(e) {
  var ss = SpreadsheetApp.openByUrl("https://docs.google.com/spreadsheets/d/1S1rRUU0AAGqVJEZq1Ff26nJ8F16mK1sXm4d3Z1vaayU/edit#gid=0");
  var sheet = ss.getSheetByName("Sayfa1");
  addUser(e, sheet);
}

function addUser(e, sheet) {
  var ad = e.parameter.ad ;

  sheet.appendRow([ad]);
}
```

Figure 12. Google Apps script function.

In the present day, the cost and complexity of traditional methods for transmitting J1939 standardized vehicle data to a remote operator have become a significant challenge. To address this issue, we have designed a system that eliminates the need for expensive GSM modules and monthly payments, and instead utilizes a commonly used smartphone, connected to the vehicle's infotainment system via Bluetooth, to provide an alternative method for transmitting the data to a remote operator. Since the data transfer occurs through a smartphone, the current location

of the vehicle and the presence of the driver can be easily tracked using simple extensions. Furthermore, in terms of safe driving, in emergency situations or in the event of an accident, the relevant authorities can be notified via the smartphone.

This communication network can also be expanded to include additional applications such as intelligent traffic density monitoring [36] or route calculation algorithms [37]. The technical feasibility and limitations of the system have not considered data security requirements related to cyber security. In the future, this study may serve as an alternative to traditional telemetry devices in fleet tracking systems. It can be utilized in the e-mobility, smart cities, and for smart transportation and route planning. This system exhibits potential for deployment in both heavy-duty vehicles and automobiles, with original equipment manufacturers being able to empower its capabilities for the purpose of remotely diagnosing and addressing vehicle malfunctions.

4. Conclusion

The proposed system offers a cost-effective and efficient solution for transmitting J1939 standardized vehicle data to a remote operator via a smartphone. The use of an Arduino-based software and hardware system, combined with a smartphone application and cloud-based services, provides real-time data visualization and the potential for expanded functionality, such as intelligent traffic density monitoring and route calculation algorithms. While the system does not currently include cyber security measures or support for real-time transmission of all data, future improvements can be made to address these limitations. Moreover, this system's potential extends beyond heavy-duty vehicles to include automobiles, making it a versatile solution for the transportation industry. Original equipment manufacturers can benefit from using this method for detecting and remotely resolving vehicle malfunctions. Overall, the system presented in this study demonstrates the technology's potential to improve safety, efficiency, and cost-effectiveness in the transportation industry. Further research and development in this area will lead to more innovative solutions.

Acknowledgment

The authors would like to thank BMC Otomotiv Sanayi ve Tic. A.Ş. for providing CAN bus data obtained from a prototype truck.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

This article does not require ethics committee approval. This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

References

- [1] Keeratiwintakorn, P., Thepnorat, E., Russameesawang, A. 2009. Mar. Ubiquitous communication for V2V and V2I for Thailand intelligent transportation system. In NTC International Conference, Thailand.
- [2] Sivanathan, A., Gharakheili, H.H., Sivaraman, V. 2020. Managing IoT cyber-security using programmable telemetry and machine learning. IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol.17, s.60-74. DOI:10.1109/TNSM.2020.2971213.
- [3] Zaldivar, J., Calafate, C.T., Cano, J.C., Manzoni, P. 2011. Providing accident detection in vehicular networks through OBD-II devices and Android-based smartphones. IEEE 36th Conference on Local Computer Networks, 4-7 October 2011, Germany, 813-819.
- [4] Sawant, P.R., Pande, S. 2015. A Mobile Application for Monitoring Inefficient and Unsafe Driving Behavior. Data Mining and Knowledge Engineering, Vol.7, s.105-7.
- [5] Prasad, B.V.P., Tang, J.J., Luo, S.J. 2019. Design and implementation of SAE J1939 vehicle diagnostics system. IEEE International Conference on Computation, Communication and Engineering (ICCC) 8-10 November, China, 71-74.

- [6] Rodríguez, A.R., Álvarez, J.R., Rodríguez, R.I. 2018. Implementation of an OBD-II diagnostics tool over CAN-BUS with Arduino. *Sistemas y Telemática*. 16(45). DOI:<https://doi.org/10.18046/syt.v16i45.2747>.
- [7] Palomino, J., Cuty, E., Huanachin, A. 2021. Development of a CAN Bus datalogger for recording sensor data from an internal combustion ECU. *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM)* (pp. 1-4). DOI:10.1109/ECMSM51310.2021.9468837.
- [8] Alvear, O., Calafate, C.T., Cano, J.C., Manzoni, P. 2015. Validation of a vehicle emulation platform supporting OBD-II communications. *12th Annual IEEE Consumer Communications and Net-working Conference (CCNC)* 9-12 January, 880-885.
- [9] Burakova, Y., Hass, B., Millar, L., Weimerskirch, A. 2016. Truck Hacking: An Experimental Analysis of the SAE J1939 Standard. *Proceedings of the USENIX Workshop on Offensive Technologies (WOOT)*. 16:211-20.
- [10] Din, M.A.C., Rahman, M.T.A., Munir, H.A., Rahman, A., Hamid, A.F.A. 2019. Development of CAN bus converter for on board diagnostic (OBD-II) system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 26-27 August, Malaysia,
- [11] Specification. Bosch, C.A., Robert Bosch GmbH, Postfach. 1991 Sep;50.
- [12] Pimple, P. 2018. Sniffing the Automotive CAN Bus for Real-Time Data-Logging and Real Time Diagnostics Display [Conference presentation]. *International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS)*, India, 167-170.
- [13] Popa, L., Groza, B., Jichici, C. & Murvay, P. S. 2022. ECUPrint—Physical Fingerprinting Electronic Control Units on CAN Buses Inside Cars and SAE J1939 Compliant Vehicles. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 17, 1185-1200.
- [14] Anil, D., Sivraj, P. 2020. Electric Vehicle Charging Communication Test-bed following CHAdeMO [Conference presentation]. *11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, India, 1-7.
- [15] Salunkhe, A. A., Kamble, P. P. & Jadhav, R. 2016. Design and implementation of CAN bus protocol for monitoring vehicle parameters [Conference presentation]. *IEEE international conference on recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT)*, 20-21 May, India, 301-304.
- [16] Santo Gitakarma, M. & Priyambodo, T. K. 2019. A Real-Time Smart Home System using Android Bluetooth Control Device Module [Conference presentation]. *International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*, 8-9 October. Indonesia, 1-7.
- [17] Fenriana, I., Putra, D. S. D., Dermawan, B. & Kurnia, Y. 2022. Smart Home Prototype with HC-05 Bluetooth and RFID Modules, Based on Microcontroller. *Bit-Tech*, 5(2), 77-84. DOI: <https://doi.org/10.32877/bt.v5i2.564>.
- [18] Desai S, Bhatshvar Y. 2023. Development of unified diagnostic services on CAN using MATLAB and Arduino. *Materials Today: Proceedings*, 72: 1935-1942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.157>.
- [19] Lakshmi, S. & Kumar, R. H. 2022. Secure Communication between Arduinos using Controller Area Network (CAN) Bus [Conference presentation]. *IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, 19-18 December. India, 1-6.
- [20] MIT App Inventor. (n.d.). <https://appinventor.mit.edu/>
- [21] Xie, B. & Abelson, H. 2016. Skill progression in MIT app inventor [Conference presentation]. *IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC)*, 4-8 September, Cambridge.
- [22] Jamaluddin, A., Harjunowibowo, D., Rahardjo, D. T., Adhitama, E. & Hadi, S. 2016. Wireless water flow monitoring based on Android smartphone [Conference presentation]. *2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)*, 6-7 October. Indonesia, 243-247.
- [23] Munasinghe, T., Patton, E. W. & Seneviratne, O. 2019. Iot application development using MIT app inventor to collect and analyze sensor data [Conference presentation]. *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 9-12 December. USA, 6157-6159.
- [24] Ceuca, E., Tulbure, A., Taut, A., Pop, O. & Farkas, I. 2013. Embedded system for remote monitoring of OBD bus [Conference presentation]. *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 8-12 May. Romania, 305-308.
- [25] Petrović, N., Roblek, V., Radenković, M. & Nejković, V. 2020. Approach to Rapid Development of Data-Driven Applications for Smart Cities using AppSheet and Apps Script [Conference presentation]. *AIIT International conference on Applied Internet and Information Technologies*, 16 October. Serbia, 77-81.
- [26] DeBell, T., Goertzen, L., Larson, L., Selbie, W., Selker, J. & Udell, C. 2019. Opens hub: Real-time data logging, connecting field sensors to google sheets. *Frontiers in Earth Science*, 7, 137. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00137>.
- [27] Thomas, A. & KP, M. S. 2019. Application of google app scripts in email for providing current awareness services to research scholars, at central university of kerala: an evaluative study. *Int J Eng Appl Sci Technol*, 4(6), 313-318.
- [28] Ameen, H. A., Zaidan, B. B., Zaidan, A. A., Saon, S., Nor, D. M., Malik et al. 2019. A deep review and analysis of data exchange in vehicle-to-vehicle communications systems: coherent taxonomy, challenges, motivations, recommendations, substantial analysis and future directions. *IEEE Access*, 7, 158349-158378. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2949130.
- [29] Engelbrecht, J., Booysen, M. J., van Rooyen, G. J. & Bruwer, F. J. 2015. Survey of smartphone-based sensing in vehicles for intelligent transportation system applications. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(10), 924-935. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2014.0248>.
- [30] Türker, G. F., & Kutlu, A. 2016. Survey of smartphone applications based on OBD-II for intelligent transportation systems. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 6(1), 69-73.
- [31] Tahat, A., Said, A., Jaouni, F. & Qadamani, W. 2012. Android-based universal vehicle diagnostic and tracking system [Conference presentation]. *IEEE 16th International Symposium on Consumer Electronics*, 4-6 June. USA, 137-143.
- [32] Meseguer, J. E., Calafate, C. T., Cano, J. C. & Manzoni, P. 2013. DrivingStyles: A smartphone application to assess driver behavior [Conference presentation]. *IEEE symposium on computers and communications (ISCC)*, 7-10 July. Croatia, 000535-000540.
- [33] Baek, S. H. & Jang, J. W. 2015. Implementation of integrated OBD-II connector with external network. *Information Systems*. 50:69-75. <https://doi.org/10.1016/j.is.2014.06.011>.
- [34] Yang, Y., Chen, B., Su, L. & Qin, D. 2013. Research and development of hybrid electric vehicles CAN-bus data monitor and diagnostic system through OBD-II and Android-based smartphones. *Advances Mechanical Engineering*. 5:741240. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/7412>.
- [35] Čabala, M., Gamec, J. 2012. Wireless real-time vehicle monitoring based on android mobile device. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 12(4).
- [36] Astarita, V., Festa, D. C. & Giofrè, V. P. 2018. Mobile Systems applied to Traffic Management and Safety: a state of the art. *Procedia computer science*. 1; 134:407-14. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.191>
- [37] Zhou, L., Chen, Q., Luo, Z., Zhu, H. & Chen, C. 2017. Speed-based location tracking in usage-based automotive insurance [Conference presentation]. *IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 5-8 June, USA, 2252-2257.



Öğütülmüş Perlit Tozunun Alternatif Pozolan Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Investigation of the Usability of Ground Perlite Powder as an Alternative Pozzolan

Beyza Erkek^{1*}, Halit Yazıcı², Bayram Tutkun³

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

³ TU Wien, Institute of Material Technology, Building Physics, and Building Ecology Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vienna, AUSTRIA

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: beyzaerkek2@gmail.com

Öz

Yapı üretiminde yaygın olarak kullanılan çimentonun, yüksek maliyeti ve çevreye olumsuz etkileri dikkate alındığında alternatif pozolanik malzemelerin kullanılabilirliğinin araştırılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Alternatif bileşenlerin kullanımı, betonun maliyetini düşürmesine ek olarak mekanik, fiziksel ve mikro yapısı gibi birçok özelliğini geliştirmektedir. Betonun temel ve en pahalı bileşeni olan çimentonun, beton tasarımında tüketiminin azaltılması hem ekonomik hem de çevresel kazanımlar sağlamaktadır. Bu çalışmada Pomza Export firmasına ait genleştirilmiş perlit, bilyalı değirmende öğütülerek kullanılmıştır. Perlit tozu 45 µm elekten elenerek incelik hakkında fikir sahibi olunmuştur. Çimento yerine ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında perlit tozu ikame edilerek pozolan olarak kullanılabilirliği gözlemlenmiştir. Pozolanik aktivite, mukavemet deneyleriyle incelenmiştir. Kontrol numunesi ve dört farklı ikame oranı için harç karışımları hazırlanmıştır. Her bir numune için 7, 28 ve 90 günlük su kürü sonunda eğilme dayanımı deneyi ve eğilme dayanımı deneyi sonrası basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Ek olarak, 90 gün kür süreli numunelere birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır. Çimento yerine, ağırlıkça %40 oranına kadar öğütülmüş perlit ikamesiyle CEM I çimentosunun maliyetini düşürmek ve çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımını azaltmak mümkün gözükmektedir.

Anahtar Kelimeler: Pozolan, Perlit, Pozolanik aktivite

Abstract

Considering the high cost and negative environmental effects of cement, which is widely used in buildings, it is necessary to investigate the possibility of using alternative pozzolanic materials. In addition to reducing the cost of concrete, the use of alternative components improves many properties of concrete such as mechanical, physical, and microstructure. Since concrete is the main and most expensive component of concrete, reducing the consumption of cement in concrete design provides both economic and environmental advantages. In this study, expanded perlite from Pomza Export company was used by grinding in a ball mill. Perlite powder was sieved with a 45 µm sieve to get an idea of the fineness. Portland cement was replaced with 10%, 20%, 30%, and 40% by weight of ground perlite powder, and perlite substituted mortars were prepared. The usability of perlite powder as pozzolan was observed. The pozzolanic activity was investigated by strength tests. Mortar mixtures were prepared for the control sample and four different replacement rates. Flexural strength test and compressive strength test after flexural strength test were applied for each sample at the end of water curing for 7, 28, and 90 days. In addition, unit weight test was applied to the samples with 90 days of curing time. It seems possible to reduce the cost of CEM I cement and reduce the CO₂ emissions from cement production by replacing ground perlite up to 40% by weight instead of cement.

Keywords: Pozzolan, Perlite, Pozzolan activity

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Carbon dioxide released into the atmosphere in the production of cement used in the concrete industry and the environmental problems it brings have been the subject of study for alternative materials. The cement manufacturing industry is estimated to produce around 1.5 billion tons of greenhouse gases annually [1]. Reducing the use of Portland cement will help to develop sustainable concrete that is less costly and has better mechanical and durability properties [3]. Pozzolans are defined as silica and

aluminous materials that gain binding properties by combining with water and calcium hydroxide in a fine-grained structure. Pozzolans are defined as silica and aluminous materials that gain binding properties by combining with water and calcium hydroxide in a fine-grained structure [6]. Natural pozzolans are the product of volcanic activities. Artificial pozzolans are released during industrial production. Depending on the type and quantity, the use of mineral additives can provide advantages such as reduced consumption of Portland cement, improved

workability, lower permeability, higher durability, and strength [9]. Furthermore, pozzolanic materials can improve the sustainability of construction activities, and reduce maintenance costs and heat of hydration [10]. Perlite is a dense and glassy volcanic rock that becomes porous by expanding to approximately 7 to 25 times its original volume when heated at temperatures between 900 and 1100 °C [14]. The color of raw perlite can vary from light gray to shiny black, and when it expands, its color becomes completely white. Raw perlite shows hydraulic activity by chemical reaction with calcium-based binders, thanks to the siliceous and aluminum compounds it contains [15]. Perlite provides good heat and sound insulation thanks to its numerous micropores. Thus, perlite is used as aggregate in the production of lightweight mortars, concretes and insulation products [16]. In a study in which raw perlite was ground in a ball mill, Kaya stated that 5% and 10% raw perlite can be used as pozzolanic material in cement and it may be possible to reduce the cost of CEM I cement [18]. In another study, the specific surface area of perlite powder was increased from 3100 cm²/g to 3900 cm²/g, and the results showed that increasing the fineness of natural perlite can be an effective method to reactivate natural perlite powder and significantly improve its transport properties [3].

Materials and Methods

The CEM I 42.5 R cement used was obtained from Soma Cement Factory. Crushed limestone of 0-5 mm size with a specific gravity of 2.62 g/cm³ and a water absorption rate of 1.92% was used as fine aggregate. Expanded perlite from Pomza Export Company was used as mineral additive. The specific gravity of the ground perlite powder used in the study was 1.9 g/cm³. The perlite powder used in the study was obtained by grinding 3 kg of expanded perlite in a ball mill at 10000 cycles. In this study, expanded perlite was ground in a ball mill and its usability as pozzolan was investigated. Perlite powder was used as a pozzolanic additive by replacing 10%, 20%, 30% and 40% by weight to cement. The water/binder ratio of the mortars is 0.5. In the mortar mixtures, 1 unit of cement (binder), 3 units of sand and 0.5 units of water were used. The prepared mixtures were placed in 40x40x160 mm metal molds. The pozzolanic activity of perlite powder was investigated by strength tests. Flexural strength and compressive strength tests were performed according to TS EN 196-1. Flexural strength test and compressive strength test after flexural strength test were applied for each sample at the end of water curing for 7, 28, and 90 days. Additionally, a unit weight test was applied to the samples cured for 90 days. The mixtures were named P0, P10, P20, P30 and P40, respectively, according to the increasing ground perlite powder replacement rate. Five different mix recipes were prepared, including a control mix. Three flexural strength specimens were used for each replacement ratio. The values for flexural and compressive strength tests were averaged. The ground perlite powder (200 g) was wet sieved with a 45 µm sieve. At the end of the sieving, 8 grams (4%) of the powder remained on the sieve.

Results and Discussion

As the replacement of ground perlite powder in the mixtures increased, the spreading diameter of the mortars decreased. As the replacement ratio increased from P0 to P40, the spreading diameter decreased from 186 mm to 156 mm. Therefore, as the replacement rate of ground perlite powder increased, a decrease in workability was observed.

Specimens containing ground perlite powder had lower flexural strength values than the control specimen at early ages. According to the 7-day graph in Figure 1, this difference became

more pronounced as the replacement rate increased. From 7 days to 28 days, the highest strength increase was 66% and 95% in the P30 and P40 series, respectively. It can be said that the flexural strength averaged the same value as the control specimen up to 10% and 20% replacement at 28 days. Among the 90-day samples, the sample with 20% ground perlite powder replacement had the highest value. The lowest strength was given by the control and 40% replacement samples. All mortar mixtures showed an increase in strength compared to 28 days. There was a 15%, 33%, 38%, 12% and 14% strength increase in P0, P10, P20, P30 and P40 samples in 90 days compared to 28 days, respectively. Compared to the control sample, the highest strength increase was 14% in the P30 sample at 28 days and 20% in the P20 sample at 90 days.

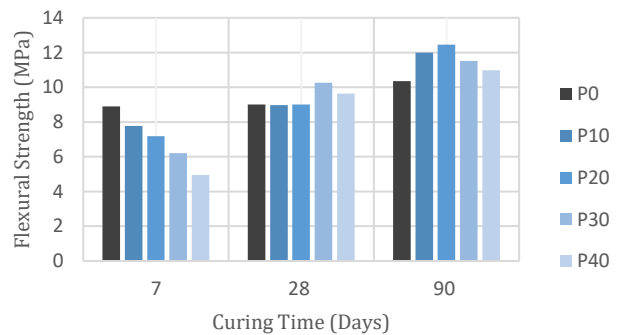


Figure 1. Effect of perlite replacement ratio on flexural strength

In Figure 2, all values in the 7th-day graph were below the control specimen. In addition, the compressive strength decreased as the replacement rate of ground perlite powder increased. When Figure 2 is analyzed, the amount of strength gain of the series between 7 days and 28 days is higher than that between 28 days and 90 days. P40 was the series with the highest strength increase from 7 days to 90 days. All mortar samples showed an increase in compressive strength values at 90 days compared to 28 days. The strengths of P0, P10, P20, P30 and P40 specimens increased by 14%, 5%, 15%, 17% and 26% respectively.

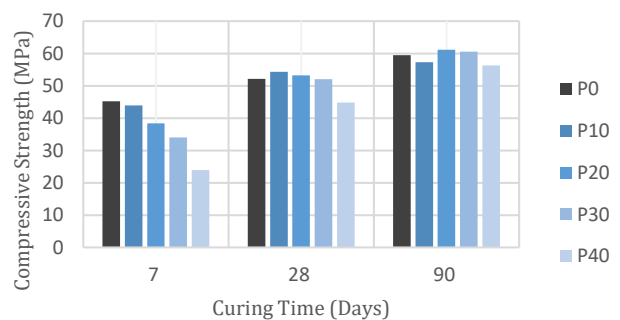


Figure 2. Effect of perlite replacement ratio on compressive strength.

While all series give unit weight values close to each other, lower unit weight values were obtained in the P40 series. The specific gravity of ground perlite powder is lower than the specific gravity of cement. Therefore, the unit weight decreased as the replacement ratio increased.

Conclusion

At early ages, the control samples, which used only cement, showed higher strengths than the samples containing ground perlite powder. At later curing times, the samples containing

ground perlite powder overtook control samples. Mortar mixtures incorporating ground perlite powder had almost the same compressive strength and flexural strength as the control mixtures, especially at the age of 90 days. When the values for flexural strength at 7 and 90 days were examined, it was observed that the use of ground perlite powder increased the strength at later ages. In the early age graphs of compressive strength, all values were below the values of the control samples. At later ages, P20 and P30 samples reached almost the same level as the control samples. The P20 series showed the best compressive strength results in both 28 and 90 days. The compressive strengths of the P40 samples were lower at all curing times. The samples showed good results in terms of compressive strength up to 20% replacement at 7 days, 30% replacement at 28 days, and 40% replacement at 90 days. In the flexural strength results, similar results to the control sample

were obtained at all replacement rates at 28 and 90 days. While ground perlite powder's effect on the strength gain of mortars was generally lower at early ages, the strength increased at later ages. There are some factors in the positive development of substituted mortar strengths. It is seen that the ground perlite powder has a pozzolanic reaction. It should be noted that the most important factor is the high SiO₂ content of perlite. It is thought that the ground dry perlite powder may have an effect on the strength development by locally reducing the water/binder ratio by absorbing the mixing water in the fresh state, and by the internal curing effect over time with the water it absorbs. In addition to these effects, the binder volume in the mixture increased slightly due to the lower specific gravity of the ground perlite powder replacement by weight instead of cement. This volume increase also positively affected strength development.

1. Giriş

Her yıl, normal Portland çimentosu üretimi dünya çapında %9 artmaktadır ve bu artış oranı, çimento üretim sürecinde atmosfere salınan büyük miktardaki karbondioksit nedeniyle çevre için çok büyük bir risk oluşturmaktadır [1]. Çimento üretimi, dünyadaki CO₂ emisyonunun %8'inden sorumludur [2]. Çimento üretim endüstrisinin yılda yaklaşık 1.5 milyar ton sera gazı ürettiği tahmin edilmektedir [1]. Beton endüstrisinin önemli çevresel etkilerini azaltmaya yardımcı olacak olası bir çözüm, beton karışım tasarımında kullanılan Portland çimentosunun bir kısmının ek çimentolu malzemelerle değiştirilmesidir [3]. Bunların yanı sıra çimento endüstrisinde enerji kullanımı, durabilite sorunları, çevresel etki ve beton yapıların ömür boyu maliyeti açısından puzolanik malzemelerin kullanımı önem taşımaktadır [4]. Bu nedenle, doğal puzolanlar gibi mevcut olan ve düşük fiyatlı ek çimentolu malzemelerin yerel kaynaklarını bulmak, beton endüstrisinin geleceği için çok önemlidir [5]. Portland çimentosu tüketiminin azaltılması, daha az maliyetli, daha iyi mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olan sürdürülebilir betonun geliştirilmesine yardımcı olacaktır [3].

Puzolanlar, doğal halde bağlayıcılığı olmayan veya çok az bağlayıcılık gösteren, ince taneli yapıda ise su ve kalsiyum hidroksitle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanan silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanırlar [6]. Puzolanlar, doğal ve yapay kategoriler olarak sınıflandırılırlar. Doğal puzolanlar volkanik faaliyetlerin ürünüdür ve kil, şeyl, laterit, boksit, kaolinit, volkanik cam, pomza, riyolit, tüf, zeolit, diatomit ve volkanik kül gibi doğal kayalar veya volkanik tortuları içerir [5]. Yapay puzolanlar ise endüstriyel üretim sırasında ortaya çıkan uçucu kül, silis dumanı ve cüruf gibi yan ürünlerdir [7]. Ancak bu puzolanlarla ilgili sorun, bazı bölgelerde ya nadiren bulunmaları ya da maliyetli olmalarıdır [5]. Volkanik lavların hızlı soğuması sonucu oluşan cam yapıya (kristal) sahip perlit gibi bazı doğal puzolanların kaynakları bol miktarda mevcuttur ve endüstriyel projelerde başarıyla kullanılmaktadır [5]. Puzolanlar, günümüzde düşük hidratasyon ısı, alkali silika reaksiyonu, geçirimsizlik ve sülfat dayanımı gibi avantajları sayesinde harç ve beton karışımlarında kullanılmaktadır [4]. Sonuç olarak, çimentoaya eklenen mineral katkıları; sera gazı salınımının azaltılması ile doğal kaynakların ve çevrenin korunması, ekonomi ve enerji tasarrufu sağlanması, hidratasyon ısısının azalması ve dayanımın zamanla artması gibi faydalar sağlayabilmektedir ve ayrıca erken dayanımlarda görülebilen azalma, çimentoyu daha ince öğütürük veya klinker özelliklerini değiştirerek çözülebilmektedir [8].

Literatürde çimento ve beton endüstrisinde mineral katkıların kullanımının faydalarını tartışan çok sayıda yayın bulunmaktadır. Türüne ve miktarına bağlı olarak katkıların kullanımları ile Portland çimentosu tüketiminde azalma, iyileştirilmiş işlenebilirlik, daha düşük geçirgenlik, daha yüksek dayanıklılık ve mukavemet gibi avantajlar elde edilebilir [9]. Ayrıca, puzolanik malzemeler betonun dayanıklılığını artırabilir, inşaat faaliyetlerinin sürdürülebilirliğini geliştirebilir, bakım maliyetlerini azaltabilir ve son olarak, hidratasyon ısısını azalttığı için puzolanik çimento kullanılarak termal çatlama önenebilir [10]. Erken dayanımın düşük olması ve soğuk havalarda priz süresinin gecikmesi dikkat edilmesi gereken önemli hususlardandır [6]. Çimento üretimi sırasında toplam elektrik enerjisi tüketiminin %50'sinden fazlası hammadde ve klinkerin öğütülmesi için kullanıldığından, Portland çimentosu tüketimindeki azalma, kalsinasyon ve öğütme sırasında daha düşük enerji tüketimi sayesinde CO₂ salınımını ve maliyeti azaltmaya yardımcı olacaktır [9]. Puzolanik etkisi olmayan katkıların bile ince öğütülmüş halde harç ve betonda su ihtiyacını azalttıkları, hidratasyonu hızlandırdıkları ve gözenekleri tıkayarak dayanıklılığı artırdıkları bildirilmiştir [8].

Puzolanlar, Portland çimentosunun kalsiyum-silikat bileşiklerinin hidratasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girebilen alüminosilikat malzemelerdir. İnce öğütülmüş puzolan, Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda meydana çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girer ve bu reaksiyon sonucunda bağlayıcı özelliği olan C-S-H jelinin miktarı artmış olur [11].

Malzemenin puzolanik aktivitesi, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girme kabiliyetidir. Bu reaksiyon sonunda portlandit (Ca(OH)₂) miktarı azalır, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) artar [12]. Puzolanik malzemenin birleşebileceği toplam kalsiyum hidroksit miktarı, puzolandaki reaktif fazın doğasına ve içeriğine, reaktif fazların SiO₂ içeriğine, kalsiyum hidroksit ve puzolan oranına ve kürlenme süresine bağlıdır [13]. Puzolanik malzemenin kalsiyum hidroksit ile reaksiyon hızı, puzolanın özgül yüzey alanına, su/katı oranına ve Portland çimentosundaki alkali içeriğine ve sıcaklığa bağlıdır [13].

Perlit doğal olarak oluşan yoğun, camsı, 900 ile 1100 °C arasındaki sıcaklıklarda ısıtıldığında, orijinal hacminin yaklaşık 7 ile 25 katına kadar genişleyerek gözenekli yapı kazanan volkanik bir kayadır [14]. Genleşen bu taneler bir köpük agregasına dönüşür ve bu ürüne genleşmiş perlit denir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişebilmektedir ve genleştiğinde rengi tamamen beyazlaşır [15]. Ham perlit,

bünyesinde bulundurduğu silisli ve alüminyumlu bileşikler sayesinde kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite gösterir ve bu özelliği sayesinde inşaat sektöründe birçok alanda kullanılmaktadır [15]. Perlitteki çok sayıda mikro gözenek hafiflik, ısı ve ses yalıtımı gibi özellikleri sağlar ve bu sayede geliştirilmiş perlit yapı endüstrisinde hafif harçlar, betonlar ve yalıtım ürünleri vb. üretiminde agrega olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [16].

Genleştirilmiş perlit; sahip olduğu fiziksel esneklik, düşük ses geçirgenliği, düşük yoğunluk, kimyasal sabitlik ve ateşe karşı dayanım gibi yapısal özellikleriyle birçok kullanım alanı sağlamıştır [17]. Genleştirilmiş perlit, başlıca inşaat sektörü olmak üzere izolasyon malzemelerinde, perlitli sıvalarda, perlit agregalı hafif yalıtım betonlarında, perlit agregalı hafif yapı elemanlarında, gevşek dolgu malzemelerinde, yüzey döşemelerinde ve özel amaçlı yapılarda kullanıldığı gibi tarım ve sanayi sektöründe de kullanılmaktadır [17].

Kaya [18], ham perlitli bilyalı değirmende öğütürerek kullandığı bir çalışmada %5 ve %10 ham perlitin çimentoda puzolanik malzeme olarak kullanılabilmesini ve CEM I çimentosundan kaynaklı maliyeti düşürmenin mümkün olabileceğini belirtmiştir. Bir başka çalışmada doğal perlitin öğütülmesinin etkinliği araştırılmış, bu bağlamda perlit tozunun özgül yüzey alanı 3100 cm²/gr'den 3900 cm²/gr'ye çıkarılmıştır ve sonuçlar, doğal perlitin inceliğini artırmanın, doğal perlit tozunu yeniden etkinleştirmek için etkili bir yöntem olabileceğini ve taşıma özelliklerini önemli ölçüde geliştirebileceğini göstermiştir [3]. Karışımların 28 ve 91 günlük yaşlar arasındaki taşıma özelliklerinde önemli bir gelişme olması, perlit tozunun puzolanik etkisinin daha uzun yaşlarda spesifik yüzey alanının artmasıyla daha önemli hale geldiğini göstermiştir [3]. Erdem vd. [9] yaptığı çalışmada perlit ikame edilmiş çimentolar, Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında özellikle erken yaşlarda dayanım kayıplarına neden olabildiğini ancak, katkılı çimentolarda perlitin devam eden puzolanik reaksiyonları nedeniyle farkların ilerleyen yaşlarda küçüldüğünü belirtmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilmiş perlit, bilyalı değirmende öğütülerek puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Puzolanik madde olarak çimentoya ağırlıkça belli oranlarda ikame yoluyla kullanılmıştır. Perlit tozunun puzolanik aktifliği mukavemet deneyleriyle yorumlanmıştır. Perlitin puzolanik aktivitesini etkileyen kriterlerin geliştirilmesi ve puzolanik kullanımının yaygınlaşması amaçlanmıştır. Böylece, beton endüstrisindeki çimento kullanımının ve çimentonun neden olduğu CO₂ salınımının azaltılmasında çözüm olabileceği düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Malzemeler

2.1.1 Çimento

Bu çalışmada Soma Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de, fiziksel özellikleri ise Tablo 2'de sunulmuştur.

2.1.2 Perlit

Bu çalışmada Pomza Export firmasına ait geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan öğütülmüş perlit tozunun özgül ağırlığı 1.9 g/cm³'tür. Malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri, malzemenin temin edildiği firmadan alınmıştır. Çalışmada kullanılan perlit tozu, 1.5 kg geliştirilmiş perlitin bilyalı değirmende 10000 devir öğütülmesiyle elde edilmiştir.

Tablo 1. Çimento ve perlitin kimyasal özellikleri.

Table 1. Chemical properties of cement and perlite.

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	Perlit
SiO ₂	19.79	73.46
Al ₂ O ₃	4.78	12.00
Fe ₂ O ₃	3.39	1.19
TiO ₂	-	0.092
CaO	63.71	0.62
MgO	1.78	0.06
Na ₂ O	0.32	2.60
K ₂ O	0.78	5.14
P ₂ O ₅	-	0.01
SO ₃	2.84	-
Cl	0.0089	-
Kızdırma kaybı	2.09	-

2.1.3 Agregada ve su

Çalışmada ince agrega olarak, özgül ağırlığı 2.62 g/cm³ ve su emme oranı %1.92 olan 0-5 mm boyutunda kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Elek analizi Tablo 3'teki gibidir. Laboratuvardaki tüm çalışmalar boyunca İzmir şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 2. Çimentonun fiziksel özellikleri.

Table 2. Physical properties of cement.

	Miktar
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3954
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.10
Priz başlangıcı (dk)	185
28 günlük dayanım (MPa)	49.8

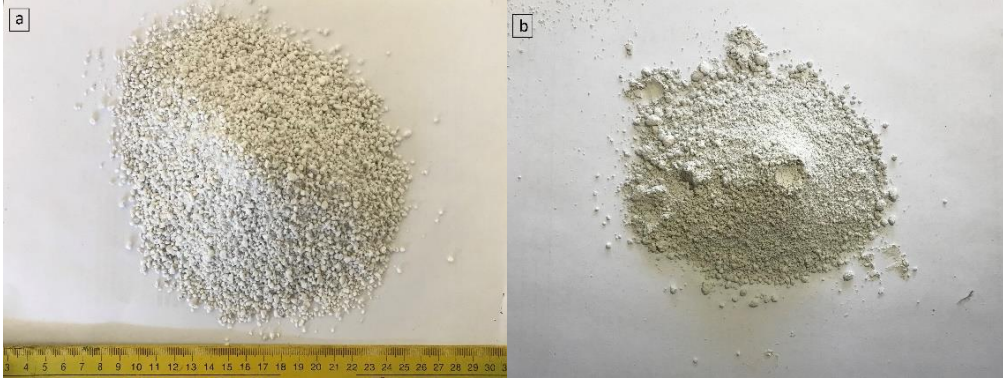
Tablo 3. Agregada elek analizi.

Table 3. Sieve analysis of fine aggregate.

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
4	94
2	65
1	46
0.5	34
0.25	25
Elek altı	0

2.2. Deneysel çalışma

Hazırlanan harç numunelerinin puzolanik aktivitesini gözlemlemek için eğilme dayanımı ve eğilme sonrası basınç dayanımı deneyi yapılmıştır (Şekil 4). Puzolan olarak kullanabilmek için 1.5 kg perlit, hızı 60 devir/dk olan bilyalı değirmende 10000 devir öğütülmüştür. Perlit, öğütülmeden önce



Şekil 1. a) Genleştirilmiş perlit, b) öğütülmüş perlit.

Figure 1. a) Expanded perlite, b) ground perlite.

100 °C etüvde 24 saat beklemiştir. Ayrıca perlit tozu da harç numunelerinin dökümünden önce aynı şekilde etüvde kalmıştır. Karışımlarda çimento, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında öğütülmüş perlit tozu ile yer değiştirmiştir. Kontrol numunesi ve artan öğütülmüş perlit tozu ikame oranına göre karışımlar sırasıyla P0, P10, P20, P30 ve P40 olarak adlandırılmıştır. Kontrol karışımı da dahil olmak üzere beş farklı karışım reçetesi elde edilmiştir (Tablo 4). Her bir ikame oranı için üç adet eğilme dayanımı numunesi kullanılmıştır. Eğilme dayanımından sonra ikiye parçaya ayrılan tüm numunelere basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için değerlerin ortalaması alınmıştır. Öğütülmüş perlit tozu içeren harç numunelerinin ortalama dayanımını, kontrol harç numunelerinin ortalama dayanımına bölünerek yüzde cinsinden bağıl dayanım grafiği elde edilmiştir. Ayrıca öğütülen perlit 200 g tartılarak 45 µm elek ile ıslak eleme yapılmıştır. Eleme sonunda alınan tozun 8 gramı yani %4'ü elek üstünde kalmıştır.

Harçların hazırlanmasında su/toplam bağlayıcı oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur. 1 birim çimento (bağlayıcı), 3 birim kum ve 0.5 birim su kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranını 0.5 tutabilmek için kullanılan 0-5 mm ince agreganın su emmesi de göz önünde bulundurulmuştur. Hazırlanan karışımlar, 40x40x160 mm'lik metal kalıplara yerleştirilmiş ve üstleri kapalı şekilde bir gün laboratuvar ortamında bekledikten sonra kalıplar sökülerek kür havuzuna yerleştirilmiştir. Numuneler, kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün boyunca kür sürecini tamamlamıştır. Günü gelen numunelere, kuru yüzey doygun haldeyken önce eğilme dayanımı deneyi ardından basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Aynı boyutlarda hazırlanan 90 gün kür süreli numunelerin, kuru haldeki birim hacim ağırlıkları verilmiştir (Tablo 5). Şekil 2'de 40x40x160 mm boyutlarında öğütülmüş perlit tozu ikameli harç karışım örneklerinin görseli bulunmaktadır.



Şekil 2. Harç örnekleri.

Figure 2. Mortar samples.

Tablo 4. Harç bileşenleri ve miktarları.

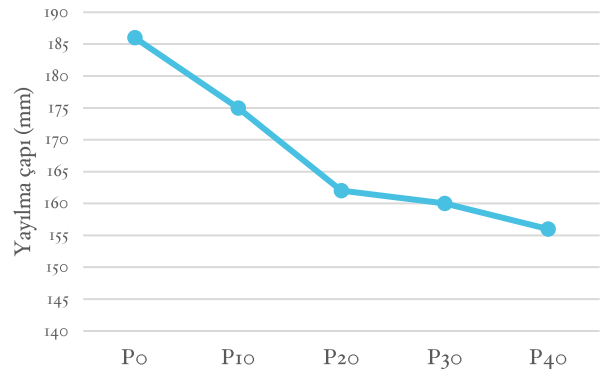
Table 4. Quantity of mortar components.

Bileşen (g)	P0	P10	P20	P30	P40
Çimento	450	405	360	315	270
Perlit Tozu	-	45	90	135	180
Agrega	1350	1350	1350	1350	1350
Su	251	251	251	251	251

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yayılma çapı

Yayılma çapı, yayılma tablası ile toplam 15 düşürme yapılarak ölçülmüştür. Karışımlarda öğütülmüş perlit tozu ikamesi arttıkça harçlarda yayılma çapında azalma olmuştur. Şekil 3'e göre, P0'dan P40'a ikame oranı arttıkça yayılma çapı 186 mm'den 156 mm'ye düşmüştür. Dolayısıyla öğütülmüş perlit tozu ikame oranı arttıkça işlenebilirlikte bir miktar azalma görülmüştür.

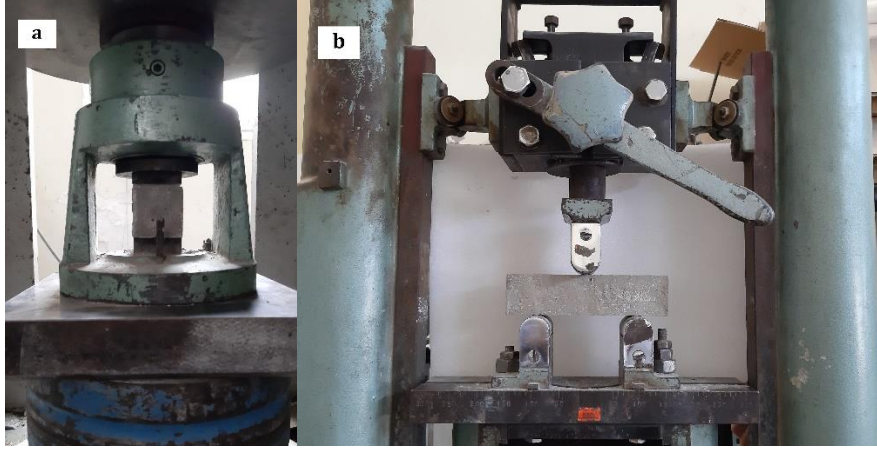


Şekil 3. Karışımların yayılma çapı değerleri

Figure 3. Flow diameter of mortar mixtures

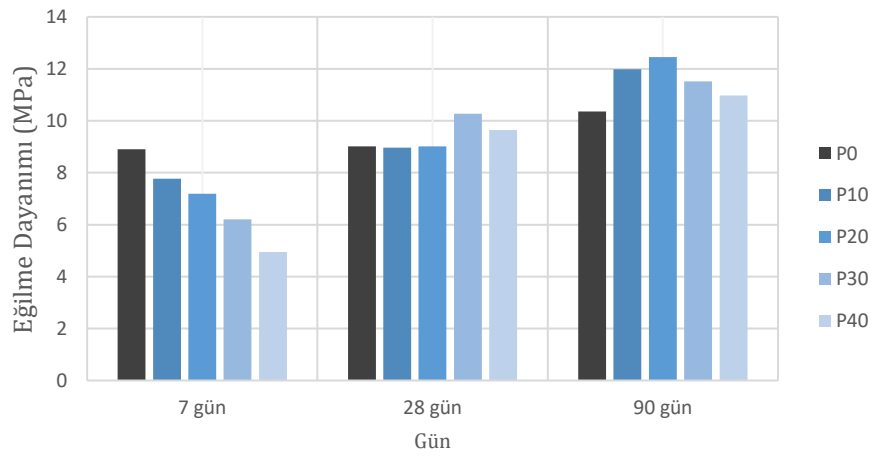
3.2. Eğilme dayanımı deneyi

Her bir harç karışım serisinden üç adet numuneye TS EN 196-1'e göre eğilme dayanımı testi yapılmıştır. Beklendiği üzere öğütülmüş perlit tozu ikameli numuneler erken yaşlarda kontrol numunesine göre daha düşük eğilme dayanımı değerleri vermiştir. Şekil 5'te 7 günlük grafiğe göre ikame oranı arttıkça bu fark belirginleşmiştir. 7 günlük kür süresinden 28 güne geçerken en yüksek dayanım artışı P30 ve P40 serilerinde sırasıyla %66 ve %95 olmuştur. Eğilme dayanımının, 28 günde %10 ve %20



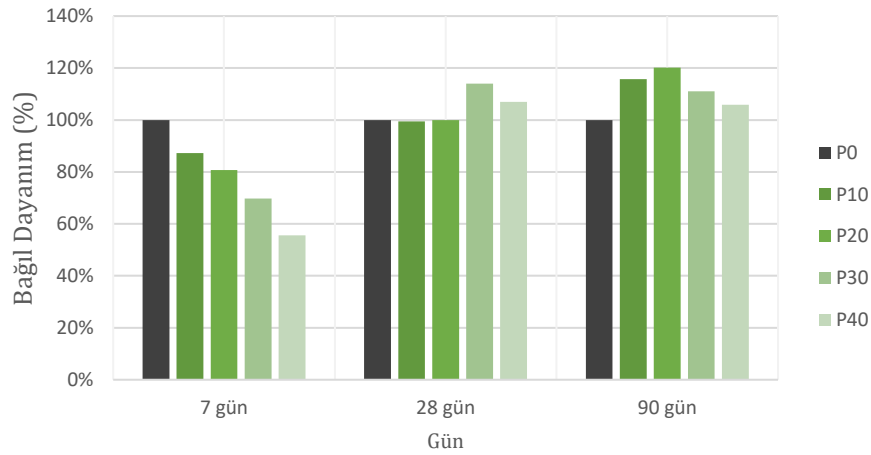
Şekil 4. a) Basınç dayanımı deneyi, b) üç noktali eğilme dayanımı deneyi.

Figure 4. a) Compressive strength test, b) three-point flexural strength test.



Şekil 5. Perlit ikame oranının eğilme dayanımına etkisi.

Figure 5. Effect of perlite replacement ratio on flexural strength.

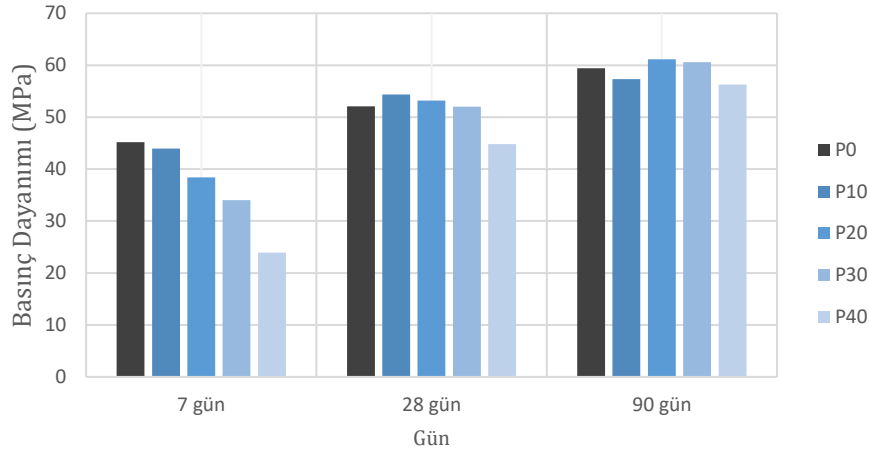


Şekil 6. Kontrol numunesine kıyasla eğilme dayanımı gelişimi.

Figure 6. Improvement of flexural strength compared to the control sample.

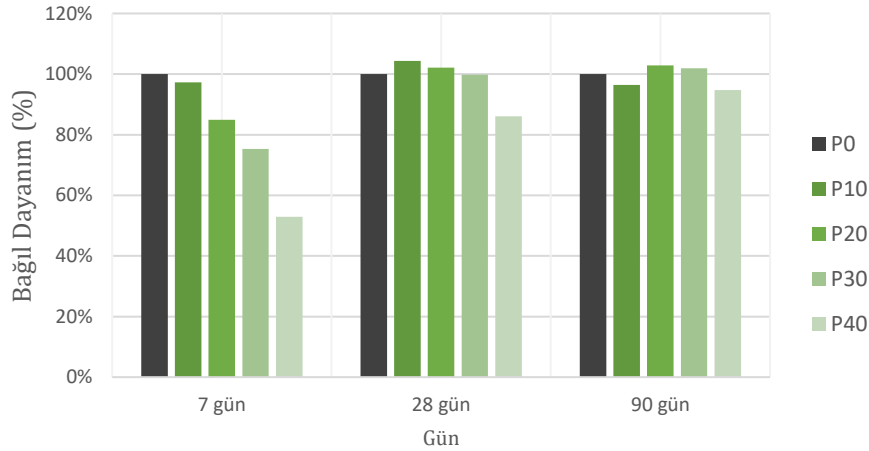
ikameye kadar kontrol numunesiyle aynı değer ortalamasında olduğu söylenebilir. P30 serisi, 28 günde kontrole kıyasla %14 daha fazla eğilme dayanımı göstermiştir ve P40 serisi 9.64 MPa dayanımla kontrol ile P30 serisi arasında bir değer vermiştir. Kontrol numunesi, 90. günde 28 güne kıyasla %15 dayanım artışı göstermiştir. 90 günlük numuneler içinde en yüksek değeri %20 öğütülmüş perlit tozu ikameli numune vermiştir. En düşük dayanımı ise birbirine yakın değerlerle kontrol ve %40 ikameli

numuneler vermiştir. Tüm harç karışımları 28 güne kıyasla dayanımlarda artış göstermiştir. Sırasıyla P0, P10, P20, P30 ve P40 numuneleri 28 güne kıyasla 90 günde %15, %33, %38, %12 ve %14 dayanım artışı olmuştur. Şekil 6'daki bağlı grafiğe bakıldığında kontrole kıyasla 28 günde en yüksek dayanım artışı %30 ikameli numunede %14, 90 günde ise %20 ikameli numunede %20 olmuştur.



Şekil 7. Perlit ikame oranının basınç dayanımına etkisi.

Figure 7. Effect of perlite replacement ratio on compressive strength.



Şekil 8. Kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımı gelişimi.

Figure 8. Improvement of compressive strength compared to the control sample.

3.3. Basınç dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı deneyinden sonra iki parçaya ayrılan numunelere TS EN 196-1'e göre basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Şekil 7'de, 7. gün grafiğinde görüldüğü üzere tüm değerler kontrol numunesinin altında kalmıştır ve öğütülmüş perlit tozu ikame oranı arttıkça dayanım azalmıştır. Kontrol numunesi ise 28 günde 6.9 MPa ve 90 günde 7.3 MPa dayanım kazanmıştır. Şekil 7 incelendiğinde serilerin 7 gün ile 28 gün arası dayanım kazanma miktarı 28 gün ile 90 gün arasındakine göre daha fazladır. P40, 7 günden 90 güne geçişte en yüksek dayanım artışı gösteren seri olmuştur ve 23.9 MPa'dan 56.3 MPa'ya iki kattan fazla dayanım artışı göstermiştir. Şekil 8'de, eğilme dayanımına kıyasla basınç dayanımı değerlerinde 28 günde P40 numunesi kontrol numunesine göre bağlı olarak %14 altında

kalmıştır. P10, P20 ve P30 numuneleri ise kontrol numunesine yakın basınç dayanımı değerleri vermişlerdir. Yine aynı şekilde tüm harç karışımı örnekleri 28 güne kıyasla 90 günde basınç dayanımı değerlerinde artış göstermişlerdir. Sırasıyla P0, P10, P20, P30 ve P40 numunelerinin dayanımları %14, %5, %15, %17 ve %26 oranlarında artmıştır.

3.4. Birim hacim ağırlık

Tablo 5'te göre tüm seriler birbirine yakın BHA değerleri verirken, P40 serisi ile daha düşük değerler elde edilmiştir. Öğütülmüş perlit tozunun özgül ağırlığı çimentonunkine kıyasla daha düşük olduğu için ikame oranı arttıkça BHA değerleri düşmüştür.

Tablo 5. 90 gün kür süreli numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları.**Table 5.** Dry unit weights of samples with 90 days of curing period.

	BHA (g/cm ³)
P0	2.11
P10	2.12
P20	2.13
P30	2.10
P40	2.04

4. Sonuçlar

Erken yaşlarda sadece çimento kullanılan kontrol numuneleri, öğütülmüş perlit tozu içeren numunelere kıyasla daha yüksek dayanımlar verirken ilerleyen kür sürelerinde öğütülmüş perlit tozu içeren numuneler kontrol numunelerini yakalayarak geçmiştir. Öğütülmüş perlit tozu içeren harç karışımları, özellikle 90 günde, kontrol karışımları ile neredeyse aynı basınç ve eğilme dayanımına sahiptir. Eğilme dayanımı için 7 ve 90 günde değerler incelendiğinde öğütülmüş perlit tozu kullanımının ileriki yaşlarda dayanımı artırdığı görülmüştür. Basınç dayanımı erken yaş grafiklerinde, tüm değerler kontrol numunesinin altında kalmıştır. İleriki yaşlarda yani 90 günde P20 ve P30 numuneleri, kontrol numunesiyle neredeyse aynı seviyeye gelmişlerdir. P20 serisi hem 28 hem 90 günde en iyi basınç dayanımı sonuçlarını vermiştir. P40 numunelerinin basınç dayanımları tüm kür sürelerinde daha düşük seyretmiştir. Numuneler, 7 günde %20, 28 günde %30 ve 90 günde %40 ikameye kadar basınç dayanımı açısından iyi sonuçlar vermişlerdir. Bu durum ikame oranı arttıkça ileri yaşlardaki dayanım gelişiminin önemini göstermektedir. Eğilme dayanımı sonuçlarında ise 28 ve 90 günde tüm ikame oranlarında kontrol numunesine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Öğütülmüş perlit tozunun, harçların dayanım kazanımına olan etkisi genel olarak erken yaşlarda daha düşükken, sonraki yaşlarda dayanımlar artmıştır. İkameli harç dayanımlarının, olumlu yönde gelişmesinde bazı etkenler bulunmaktadır. Öğütülmüş perlit tozunun pozolanik reaksiyon yaptığı görülmektedir. Burada en önemli faktörün, perlitin sahip olduğu yüksek SiO₂ içeriği olduğu belirtilmelidir. Öğütülmüş kuru perlit tozunun, taze halde karışım suyunu bir miktar emmesiyle su/bağlayıcı oranını lokal azaltarak ve bünyesine çektiği su ile zamanla içsel kütleme etkisiyle de dayanım gelişimine etkisi olabileceği düşünülmektedir. Bu etkilerin yanı sıra çimento yerine ağırlıkça ikame edilen öğütülmüş perlit tozunun özgül ağırlığının daha düşük olması sebebiyle karışımın bağlayıcı hacmi bir miktar artmıştır. Bu hacim artışı da dayanım gelişimini olumlu yönde etkilemiştir. Sonuç olarak öğütülmüş perlit tozunun çimentoya ağırlıkça ikamesiyle harçların işlenebilirliğinde ve birim hacim ağırlığında azalma, basınç ve eğilme dayanımında ise kayda değer bir gelişme görülmüştür. Öğütülmüş perlitin ileri yaşlardaki pozolanik aktivitesi göz önünde bulundurulduğunda, 10000 devir öğütülmüş ve %96'sı 45 µm elekten geçen perlitin, çimentoya katkı malzemesi olarak kullanılmasının dayanım açısından iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Erdem vd. [9], yaptıkları çalışmada aynı incelikte perlit içeren harçların dayanımları karşılaştırıldığında %20 ikamenin %30 ikameye göre daha yüksek dayanımlar elde ettiğini belirtmişlerdir. 80 µm'de eleme perlit tozunun kullanıldığı başka bir çalışmada ise betonun mekanik özelliklerini iyileştirmede çimentonun en iyi ikame oranlarının %10 ve %20 söylenmiştir [19]. Dolayısıyla,

öğütülmüş perlit tozu ikamesiyle CEM I çimentosundan kaynaklı maliyeti düşürmek ve CO₂ salınımını azaltmak mümkün olacaktır. Pozolan kullanımının çeşitlendirilmesi ve yaygınlaştırılması ile çimento kullanımında tasarruf ile hem çevreci hem de ekonomik yapılar inşa edilebilecektir. Öğütülmüş perlit tozu ikamesinin, olumlu yönlerine karşı durabilite sorunlarına yol açmadığı incelenmeye devam edilmelidir. Portland çimentosunun bir kısmının doğal pozolanlar ile ikame edilmesi, beton endüstrisinin karbon ayak izini ve inşaat maliyetlerini azaltmak ve genel anlamda beton dayanıklılığını artırmak için etkili bir çözüm olabilir [3].

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, perlit temini için Pomza Export Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ve Ümit ÜRÜN'e, ayrıca çimento ve agrega temini için Dere Beton'dan Raif EVLEK'e teşekkürlerini sunar. Bu çalışma, yazarlardan Beyza ERKEK'in Alternatif Pozolanik Malzemelerin Kullanımının Araştırılması başlıklı yüksek lisans tezinin bir parçasıdır ve son olarak Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür edilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Alqarni, A.S. 2022. A Comprehensive Review on Properties of Sustainable Concrete Using Volcanic Pumice Powder Ash as a Supplementary Cementitious Material, Construction and Building Materials, Cilt. 323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126533
- [2] Ulusu, H., Aruntas, H.Y., Gencel, O. 2016. Investigation on Characteristics of Blended Cements Containing Pumice, Construction and Building Materials, Cilt. 118, s. 11-19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.030
- [3] Karein, S.M.M., Vosoughi, P., Isapour, S., Karakouzian, M. 2018. Pretreatment of Natural Perlite Powder by Further Milling to Use as a Supplementary Cementitious Material, Construction and Building Materials, Cilt. 186, s. 782-789. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.012
- [4] Bulut, Ü. 2007. Perlitin Pozolanik Aktivitesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 162s, İstanbul.
- [5] Karein, S.M.M., Joshaghani, A., Ramezaniyanpour, A.A., Isapour, S. 2018. Effects of the Mechanical Milling Method on Transport Properties of Self-Compacting Concrete Containing Perlite Powder as a Supplementary Cementitious Material, Construction and Building Materials, Cilt. 172, s. 677-684. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.205
- [6] Aslan, M.G. 2015. Mikronize Filtre Perlitin Betonda Mineral Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı. Avrasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Trabzon.
- [7] Erdoğan, T.Y. 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara, 757s.
- [8] Yeğinobalı, A. 2011. Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 48s.
- [9] Erdem, T.K., Meral, Ç., Tokyay, M., Erdoğan, T.Y. 2007. Use of Perlite as a Pozzolanic Addition in Producing Blended Cements, Cement & Concrete Composites, Cilt. 29, s. 13-21. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.018
- [10] Páez-Flor, N.M., Rubio-Hernández, F.J., Velázquez-Navarro, J.F. 2019. Microstructure-at-rest Evolution and Steady Viscous Flow Behavior of Fresh Natural Pozzolanic Cement Pastes, Construction and Building Materials, Cilt. 194, s. 360-371. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.009
- [11] Dolgun, O. 2010. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Öğütülmüş Pomza Kullanabilirliğinin Araştırılması. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88s, Niğde.
- [12] Çoban, Ö., Sancak, E. 2013. Krom Atığı Katkılı Harçların Pozolanik Aktivite ve Kilçallıklarına Farklı Kür Sularının Etkisi. Beton 2013 Kongresi Bildirileri, 21-23 Şubat, İstanbul, 313-323.
- [13] Singh, M. 2018. Coal Bottom Ash. ss 3-50. Siddique, R., Cachim, P. 2018. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Woodhead Publishing, GB, 640s.
- [14] Davraz, M., Koru, M., Akdağ, A.E., Kılınçarslan, Ş., Delikanlı, Y.E., Çabuk, M. 2020. Investigating the Use of Raw Perlite to Produce Monolithic Thermal Insulation Material, Construction and Building Materials, Cilt. 263. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120674
- [15] Maden Tetkik ve Arama. Perlit. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/perlit> (Erişim Tarihi: 12.02.2023)

- [16] Xu, F., Peng, C., Zhu, J., Chen, J. 2016. Design and Evaluation of Polyester Fiber and SBR Latex, *Construction and Building Materials*, Cilt. 127, s. 751-761. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.060
- [17] Ramazanođlu, B. 2020. Yaıtım Şaplarında Bitlis Yöresi Pomza Taşıının Perlit ile Birlikte Kullanımının İncelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Bitlis.
- [18] Kaya, E. S. 2019. Ham Perlit ve Genleştirilmiş Perlitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, Balıkesir.
- [19] Fodil, D., Mohamed, M. 2018. Compressive Strength and Corrosion Evaluation of Concretes Containing Pozzolana and Perlite Immersed in Aggressive Environments, *Construction and Building Materials*, Cilt. 179, s. 25-34. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.190



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Hassas Tarımda Nesnelerin İnterneti Destekli Akıllı Traktör ile Zirai İlaçlama ve Gübreleme

Agricultural Spraying and Fertilizer with Smart Tractor Supported by the Internet of Things in Precision Agriculture

Hakan Dalkılıç^{1*}, Mehmet Hilal Özcanhan²

¹ Yaşar Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: hakan.dalkilic@yasar.edu.tr

Öz

Günümüzde tarımsal faaliyetler, teknolojik yenilikler ile gelişimlerini sürdürmektedir. Bilgi ve iletişim teknolojilerinin tarımda gelişmiş sistemler oluşturarak kullanılmasıyla Hassas Tarım kavramı ortaya çıkmaktadır. Nesnelerin ve sensörlerin internet aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurduğu Nesnelerin İnterneti teknolojileri Hassas Tarım kullanımını desteklemektedir. Tarım alanında yapılan çalışmaların etkinliğinin artırılarak daha verimli sonuçlar alınması, aynı zamanda bilgi alışverişinin hızı ve sürekliliği ile birlikte daha kaliteli ürünler alınmasını sağlamak mümkün hale gelmektedir. Tarlalarda yapılan ilaçlama ve gübreleme işlemlerinin otomasyon sistemi kullanılarak daha hızlı ve etkin bir şekilde yapılabilmesi Nesnelerin İnterneti cihazları ile mümkün olmaktadır. Böylelikle ilaçlama ve gübreleme zamanının, lokasyonunun ve miktarının elektronik donanımlar ile kontrol altında olması sağlanabilmektedir. Yapılan çalışma ile, Nesnelerin İnterneti cihazlarının kullanıldığı ve üzerinde tablet olan akıllı traktör prototipi oluşturulmuştur. Prototip üzerindeki tablet aracılığıyla küresel konumlama sistemi (GPS) üzerinden bilgilerin alınması ve traktörün belirlenen alan üzerinde gezinmesini sağlamak üzere mobil uygulama geliştirilmiştir. Oluşturulan akıllı traktör, topladığı GPS bilgileri doğrultusunda harita üzerinde belirtilen alanda kendisi gezinerek veya mobil uygulama üzerinden yönlendirilerek ilaçlama ve gübreleme yapılmasını sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hassas Tarım, Nesnelerin İnterneti, Akıllı Traktör

Abstract

Today, agricultural activities continue their development with technological innovations. The concept of precision agriculture emerges with the use of information and communication technologies by creating advanced systems in agriculture. IoT technologies, in which objects and sensors communicate with each other via the Internet, support the use of precision agriculture. It becomes possible to obtain more efficient results by increasing the effectiveness of the studies in the field of agriculture, and to obtain higher quality products with the speed and continuity of information exchange. It is possible to carry out the spraying and fertilization processes in the fields more quickly and effectively by using the automation system, with the Internet of Things devices. In this way, it can be ensured that the time, location and amount of spraying and fertilization are under control with electronic equipment. With the study, a smart tractor prototype with a tablet on which internet of things devices are used has been created. A mobile application was developed to receive information from the global positioning system (GPS) via the tablet on the prototype and to enable the tractor to navigate over the designated area. The created smart tractor provides spraying and fertilization by navigating the area specified on the map in line with the GPS information it collects, or by directing it via the mobile application.

Keywords: Precision Agriculture, Internet of Things, Smart Tractor

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Agricultural activities are strengthened and developed with the contributions of information technologies in today's rapidly advancing technology. The concept of Smart Agriculture has emerged with advanced systems created using computers, electronic devices such as sensors and Cloud Computing. Precision Agriculture has become more possible with the inclusion of the use of today's Internet of Things, IoT sensors. Technological infrastructures such as global positioning system (GPS), geographic information systems and remote sensing

systems have become more and more present in agricultural activities.

The technical organization in Precision Agriculture is realized by connecting wireless communication with the Internet. With wireless IoT devices, hard-to-reach agricultural lands can be accessed and information such as soil temperature, humidity, ambient temperature, plant colors, pest and harmful animal activities and similar information can be collected through sensors. The collected information can be stored on a central server with the contribution of Cloud Computing technologies

and then used in decision-making systems with the support of Artificial Intelligence applications. Artificial Intelligence is defined as a structure that can make decisions based on the information it learns by imitating human intelligence. With the inclusion of unmanned aerial vehicles (UAVs) in Precision Agriculture, it has become possible to deliver agricultural land data, including images, to Cloud Computing. Thus, by analyzing the data collected in Cloud Computing, necessary operations such as irrigation, fertilization and spraying can be performed remotely in agricultural areas. In addition to all these, Artificial Intelligence techniques are used to ensure that agricultural activities are carried out with minimum error. In this way, irrigation, fertilization and spraying operations are less erroneous, faster and thus more economical.

If the amount of pesticide or fertilizer to be transported is high and the spraying or fertilization time is long, it is preferred to spray with tractors. However, tractor spraying/fertilization, which depends on the farmer's driving ability or meticulousness, cannot be carried out with sufficient efficiency. One of the most important factors affecting inefficiency is the low accuracy of the dosage or type of pesticide that is suitable for the field conditions. However, it is thought that automated spraying-fertilization will be more efficient since the application of pesticides or fertilizers to the points determined by computer-controlled electronic equipment will be more accurate. According to this view, spraying-fertilization operations with computer-aided IoT technologies will increase efficiency and reduce processing time compared to manual operations.

There are many studies on Precision Agriculture in the literature. In the study by Balaska et al., activities that can be done on how to provide solutions to current threats to agriculture such as climate change, diseases and similar threats with the use of robotics and Artificial Intelligence are included [1]. In the study, it is stated that drones equipped with cameras can provide real-time data on crop health and potential threats by quickly inspecting agricultural areas, and more precise and accurate information about crop health can be provided with Machine Learning. Shaikh et al. describe the functions of Internet of Things devices, Machine Learning, sensors and Artificial Intelligence technologies in agriculture [2]. In this study, Artificial Neural Networks based optimization was performed to evaluate the nitrogen status of wheat crop. It is shown that the optimization approach can significantly distinguish wheat crop from undesirable plants.

In our study, we propose a fast and efficient fully automatic simultaneous spraying and fertilization method by the "Smart Tractor" that we designed according to the pesticide and fertilization maps determined by the Ministry of Agriculture and Livestock through Cloud Computing supported IoT devices.

Materials and Methods

In our study, a prototype with hardware and software elements was designed and a sample system capable of autonomously spraying and fertilizing agricultural lands with minimal need for human factors was produced.

An example Smart Tractor prototype for Precision Agriculture applications was designed using a tablet or mobile phone, IoT devices, sensors and communication modules as hardware. A battery-powered mini tractor was used for the tractor prototype that will perform agricultural spraying-fertilization. Distance sensors positioned at the front of the tractor are used to stop the vehicle in case of sudden obstacles. At the rear of the tractor, there are spray motors and sprinklers that can spray and fertilize at the same time. At the center of the system, there is an Arduino

Uno board that controls the software, a tablet with a map of the field and a GPS sensor. The steering wheel of the battery tractor, which can be moved manually, has been modified and controlled by a stepper motor. The foot-controlled gas and brake pedals are controlled by a relay using the output voltages of an Arduino Uno board used as a control card. The GPS sensor on the tablet is used for the location information of the tractor. The GPS information received from the tablet is transferred to the Arduino Uno board via wireless Bluetooth communication. The motor control circuit on the Arduino Uno board controls the stepper motor through a belt connected to the steering wheel to turn the steering wheel of the tractor.

In summary, the designed circuit includes stepper motor, motor control circuit, Arduino Uno, HC-05 Bluetooth module, HC-SR04 Distance sensor, 2 relay modules, a battery and a 5 volt battery. The battery supplies the energy of the motor control circuit and the stepper motor, while the battery supplies the Arduino Uno and the circuit elements connected to it and the motor that pushes the tractor at a constant speed.

A map provided by the Ministry of Agriculture and Forestry showing the need for pesticides and fertilizers for the field is loaded onto the tablet. According to the data from the GPS on the tablet, the tractor moves forward and turns on the spraying-fertilization engines in the areas where they are needed. In other words, the application on the tablet determines in which area the tractor should travel and activates the spraying-fertilization system on the tractor as it travels.

A mobile application has been developed for the proposed design. The location of the designed smart tractor on the map is determined by GPS supported open access mapping sites. It was planned to use differential GPS (DGPS) method to display and control the location of the tractor at centimeter level, but it could not be added to the prototype due to the high cost hardware requirement. Our mobile application determines the location on the tablet with Android operating system positioned on the Smart Tractor. In addition to the autonomous movement of the tractor in the field, it can be controlled wirelessly via Bluetooth connection via the mobile application. The tractor can be directed forward, backward, right and left on the mobile application screen. The tractor navigates in the selected area on the mobile application and in this process, agricultural spraying takes place with the spraying system on the tractor.

Results

In order to test the vehicle, which became a smart tractor with the equipment added to it, a test environment was created by receiving GPS signal with a tablet in an open area. An area where the tractor's wheels can move was preferred for the test environment. The location of the tractor was determined on the map with the mobile application running on the tablet. A command was given on the application by specifying the area where the tractor would travel to spray. The mobile application processed the information on the map and sent information to the control unit via Bluetooth and enabled the tractor to move forward, backward, left and right in the field. Meanwhile, the movements of the tractor were observed. Considering the advantages of the developed system, computer-controlled spraying and fertilization of the fields will make it more efficient to adjust the dosage of spraying and fertilization. At the same time, it will be ensured that the correct points are sprayed and fertilized efficiently with the process carried out at the locations specified via GPS. In addition, by recording the spraying and fertilization information on the cloud, it will be easier to keep an

inventory of spraying and fertilization in agricultural areas and to access the information instantly.

Discussion and Conclusion

In this study, a prototype has been developed for the automatical spraying and fertilization in the farmlands, by using latest IT technologies. The purpose of creating a prototype originates from the goal of moving the tractor with the help of custom developed software and IoT devices to carry out the spraying and fertilization, efficiently. In order to carry out the activities, the tablet on the smart tractor determines the location via a GPS and the movement of the tractor is guided by the spray and fertilizer information on the Ministry of Agriculture cloud servers. In

addition, after the smart tractor travels and performs the spraying and fertilization operations, the information of the treated area is sent to the cloud servers. Thus, it is ensured that the spraying and fertilization status of the fields on the cloud servers are updated, instantly. In addition, an application running on the Android operating system has been developed, allowing the location of the tractor to be determined. Thus, spraying and fertilizing by moving within the determined area has been made possible. It is also possible to remotely control the tractor by using the direction keys via the mobile application on a mobile phone.

1. Giriş

Tarımsal faaliyetler, teknolojinin hızla ilerlediği günümüzde bilişim teknolojilerinin katkılarıyla güçlenmekte ve gelişmektedir. Bilgisayarlar, algılayıcılar (sensörler) gibi elektronik cihazlar ve Bulut Bilişim kullanılarak oluşturulan gelişmiş sistemler ile de "Hassas Tarım (Smart Agriculture)" kavramı ortaya çıkmıştır. Günümüzdeki Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) sensörlerinin kullanımının da dahil olmasıyla Hassas Tarım daha mümkün hale gelmiştir. Küresel konumlama sistemi (GPS), coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama sistemleri gibi teknolojik altyapılar kendilerini tarım faaliyetlerinde daha çok gösterir olmuştur. Böylece, Her An-Her Yerden-Herşeyin (Any Time- Any Place-Any Thing) çalıştığı otomasyon sistemleri (ubiquitous systems) tarım alanına da yanıtılarak Hassas Tarımın gelişmesi ivmelenmiştir. Hassas Tarım ile tarımsal aktiviteler ve işlemlerin verimliliğinin artırılabilceği görülmüştür [3-4].

Hassas Tarımda teknik organizasyon kablosuz iletişimin İnternet ile irtibatlandırılması ile gerçekleştirilmektedir. Kablosuz IoT cihazları ile ulaşılması zor tarım arazilerine ulaşım sağlanarak sensörler aracılığıyla toprak ısı, nemi, ortam sıcaklığı, bitki renkleri, haşare ve zararlı hayvan faaliyetleri ve benzeri bilgiler toplanabilmektedir. Toplanan bilgiler Bulut Bilişim teknolojilerinin de katkılarıyla merkezi bir sunucuda depolanarak daha sonra Yapay Zeka uygulamalarının da desteğiyle karar verme sistemlerinde kullanılabilir. Yapay Zeka, insan zekasını taklit ederek, öğrendiği bilgiler doğrultusunda karar verebilen bir yapı olarak tanımlanmaktadır. İnsansız hava araçlarının (İHA) da Hassas Tarıma dahil edilmesiyle tarım arazisi verilerinin görüntüleri dahil Bulut Bilişime ulaştırılması mümkün hale gelmiştir. Böylece, Bulut Bilişimde toplanan veriler analiz edilerek tarım alanlarında, gerekli olan sulama, gübreleme ve ilaçlama gibi işlemler uzaktan gerçekleştirilebilmektedir. Tüm bunlara ilaveten, Yapay Zeka teknikleri kullanılarak tarımsal faaliyetlerin en az hata ile gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde yapılan sulama, gübreleme ve ilaçlama işlemleri daha az hatalı, daha hızlı ve böylece daha ekonomik olmaktadır.

Tarım ürünleri birçok çevresel faktörden dolayı zarar görmektedir [5]. Tarımsal verimliliği düşüren bu faktörler çoğunlukla tabiat ilintili olmaktadır. Örneğin, tarım ürünlerinin zarar görmesinin başlıca nedenlerinden birisi böcek, solucanlar, diğer haşare, yaban domuzları ve kargalar gibi hayvanlarının neden olduğu saldırılardır [6]. Tarım ürünlerini bu gibi saldırılardan korumak için çiftçiler ilaçlama, sesle kovma gibi yöntemleri kullanmaktadırlar. İlaçlama işlemi birbirinden farklı ilaçlama sistemleri ile yapılmaktadır. Gelişen IoT teknolojileri ile ilaçlama işleminin İHA veya benzeri donanımlar ile uzaktan kontrol edilebilir bir şekilde yapılması mümkün hale gelmiştir [7-

9]. Taşınması gereken ilaç veya gübre miktarının fazla, ilaçlama veya gübreleme süresinin de uzun olması durumunda traktörler ile ilaçlama yapılması yoluna gidilmektedir. Ancak çiftçinin araç kullanma kabiliyeti veya titizliğine bağlı olan traktörlü ilaçlama/gübreleme yeterli verimlilikte yapılamamaktadır. Verimsizliğe etki eden en önemli faktörlerden biri de tarla koşullarına uygun olacak dozajda veya tipte ilacın doğru noktaya atılma isabetinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Oysa tarım ilacı veya gübrenin bilgisayar kontrollü elektronik donanımlar vasıtasıyla belirlenen noktalara uygulanması daha isabetli olduğundan, otomasyonlu ilaçlama-gübrelemenin daha verimli olacağı düşünülmüştür. Bu görüşe göre, bilgisayar destekli IoT teknolojileri ile yapılan ilaçlama-gübreleme işlemleri, manuel olarak yapılan işlemlere oranla verimliliği arttıracak ve işlem süresini azaltacaktır.

Literatürde Hassas Tarım üzerine yurtdışı ve yurtiçi yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Özcan ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, IoT cihazları ile süt sağımında miktarların ve sıcaklıkların kablosuz iletişime sunucuya aktarıldığı, sonrasında mobil cihazlardan görüntülenebildiği bir sistem tasarlanmıştır [10]. Tasarlanan sistemde tarih aralıkları seçilerek sağım miktarları ve süt sıcaklıkları hakkında rapor alınabilmektedir. Hassas Tarımda kablosuz algılayıcı Ağların kullanımına yönelik bir çalışma da Dilay ve diğerleri tarafından yapılmıştır [11]. Başka bir çalışmada Kurt ve diğerleri tarımsal bir alanın sulanması ve gübrelenmesi için mobil bir uygulama ile uzaktan kontrol edilebilir bir IoT sistemi tasarlamışlardır [12]. Tasarlanan sistemde mobil uygulama üzerinden sistemin herhangi bir andaki durumu takip edilebilmekte ve e-posta vasıtasıyla bildirim yapılabilme özelliği bulunmaktadır. Comart ve diğerleri tarafından IoT teknolojisinin tarımsal alandaki uygulamaları hakkında bir literatür araştırması yapılmıştır [13]. Araştırmada, araştırma öncesine kadar yapılan IoT teknolojisinin kullanıldığı Hassas Tarım çalışmaları incelenmiştir. Emekli ve Topakçı tarafından yapılan çalışmada ise Hassas Tarım teknolojilerinin tarımsal sulama alanındaki kullanımları incelenmiştir [14]. Araştırmacılar genelde, daha etkin tarımsal üretim gerçekleştirilmesi için gelişen teknolojilerden yararlanılmaya çalışıldığını belirtmişlerdir. Balaska ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, tarıma yönelik iklim değişikliği, hastalıklar ve benzeri mevcut tehditlerin, robot teknolojileri ve Yapay Zeka kullanımı ile nasıl çözüm sunulacağına ilişkin yapılabilecek faaliyetlere yer verilmiştir [1]. Çalışmada kameralarla donatılmış dronelerin tarım alanlarını hızlı şekilde inceleyerek ürün sağlığı ve potansiyel tehditler hakkında gerçek zamanlı veriler sağlayabileceği; Makina Öğrenimi ile de ürün sağlığı hakkında daha kesin ve doğru bilgiler sağlanabileceği belirtilmiştir. Shaikh ve diğerlerinin yaptığı çalışmada ise Nesnelerin İnterneti cihazları, Makina Öğrenimi, sensörler ve Yapay Zeka teknolojilerinin tarımdaki fonksiyonları

anlatılmaktadır [2]. Çalışmada, buğday mahsulündeki nitrojen durumunun değerlendirilmesi için Yapay Sinir Ağları tabanlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon yaklaşımı ile buğday mahsulünün istenmeyen bitkilerden önemli ölçüde ayırt edilebileceği gösterilmiştir. Qazi ve diğerleri de IoT teknolojileri ve Yapay Zeka tekniklerinin Akıllı Tarıma uygulamalarındaki gelişmeler hakkında ayrıntılı araştırma yapmışlardır [15]. Bu araştırmada, belirtilen iki teknolojinin uygulanmasındaki zorlukları incelenmiştir. Kadıoğlu ve diğerleri kaliteli tohum üretimi için kuru fasulye türlerinin Yapay Zeka tabanlı sınıflandırılması ile ilgili çalışma yapmışlardır [16].

Bizim çalışmamızda ise Bulut Bilişim destekli IoT cihazları vasıtasıyla tarlaların Tarım ve Hayvancılık Bakanlığının belirlediği ilaç ve gübreleme haritalarına göre tasarladığımız "Akıllı Traktör" tarafından hızlı ve verimli şekilde tam otomatik aynı anda ilaçlanması ve gübrelenmesi yöntemi önerilmektedir.

2. Kullanılan Donanım ve Tasarlanan Yazılım

Yaptığımız çalışmada donanım ve yazılım öğeleri bulunan bir prototip tasarlanarak, tarım arazilerinin insan faktörüne asgari ihtiyaçla otonom olarak ilaçlama ve gübreleme kabiliyetine sahip bir örnek sistem üretilmiştir.

2.1. Donanım yapısı

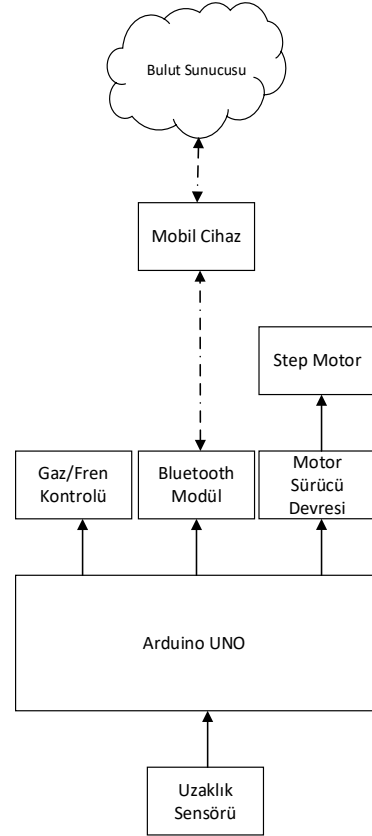
Donanım olarak tablet veya cep telefonu, IoT cihazları, algılayıcılar ve iletişim modülleri kullanılarak Hassas Tarım uygulamaları için örnek bir Akıllı Traktör prototipi tasarlanmıştır. Zirai ilaçlama-gübreleme yapacak traktör prototipi için Şekil 1'de gösterilen akülü bir mini traktör kullanılmıştır.



Şekil 1. Akıllı traktör.

Figure 1. Smart tractor.

Şekil 2'de, tasarlanan sistemin blok diyagramı gösterilmektedir. Traktörün ön kısmında bulunan uzaklık sensörleri ani karşılaşılabilecek engeller durumunda aracı durdurmak için kullanılmaktadır. Traktörün arka kısmında aynı anda ilaçlama ve gübreleme yapabilen püskürtme motor ve fiskeyeleri yer almaktadır.

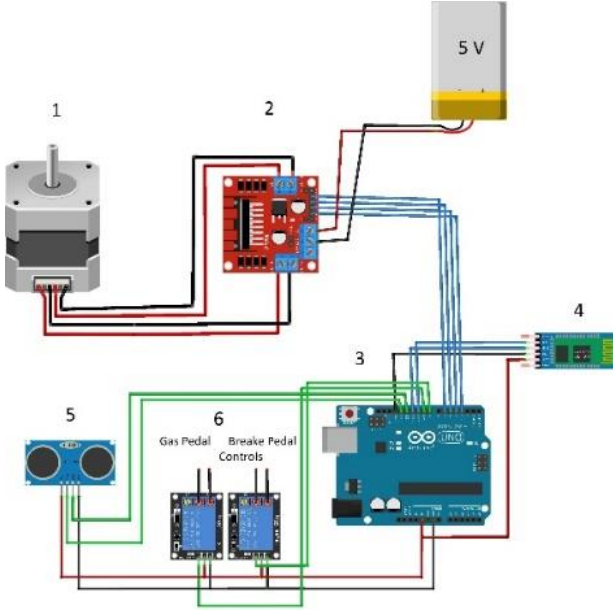


Şekil 2. Tasarlanan sistemin blok diyagramı.

Figure 2. Block diagram of the designed system.

Sistemin merkezinde yazılımları, tarlaya ait haritayı ve GPS sensörünü barındıran tablet ile kontrolü denetleyen Arduino Uno kartı bulunmaktadır. Akülü traktörün manuel olarak hareket ettirilebilen direksiyonu tadilat yapılarak, bir step motoru ile kumanda edilmektedir. Ayakla kumanda edilen gaz ve fren pedalları ise kontrol kartı olarak kullanılan bir adet Arduino Uno kartının çıkış voltajları kullanılarak röle ile kumanda edilmektedir. Traktörün konum bilgisi için tablet üzerindeki GPS sensörü kullanılmıştır. Tabletten alınan GPS bilgileri kablosuz Bluetooth iletişimi ile Arduino Uno kartına aktarılmaktadır. Arduino Uno üzerindeki motor kontrol devresi dümene bağlanmış bir kayış sayesinde step motoru kontrol ederek traktörün direksiyonunun döndürülmesini sağlamaktadır. Kullanılan donanımsal devre elemanları ve bağlantı şeması Şekil 3 de gösterilmektedir. Özetle, tasarlanan devrede step motor (1), motor kontrol devresi (2), Arduino Uno (3), HC-05 Bluetooth modülü (4), HC-SR04 Mesafe sensörü (5), 2 adet röle modülü (6), bir akü ve bir adet 5 voltluk pil bulunmaktadır. Pil, motor kontrol devresi ve step motorunun enerjisini beslerken, akü de Arduino Uno ve ona bağlı devre elemanları ile traktörü iten motorun sabit hızda ilerlemesini beslemektedir.

Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından sağlanan, tarlaya ait ilaç ve gübre ihtiyacını gösteren harita tablete yüklenmektedir. Tablet üzerindeki GPS'den gelen verilere göre traktör ilerlemekte ve ilaçlama-gübreleme motorlarını ihtiyaç olan bölgelerde açmaktadır. Diğer bir deyişle, tablet üzerindeki uygulama, traktörün hangi alanda gezmesi gerektiği belirlemekte ve traktör gezerken üzerindeki ilaçlama-gübreleme sistemini çalıştırmaktadır.

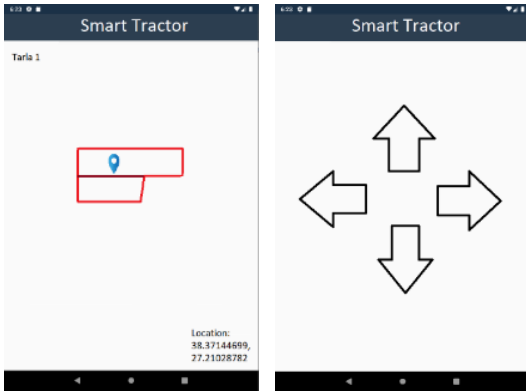


Şekil 3. Akıllı traktör kontrol ünitesi devre tasarımı.

Figure 3. Smart tractor control unit circuit design.

2.2. Tasarlanan yazılım

Önerilen tasarım için mobil uygulama geliştirilmiştir. Tasarlanan akıllı traktörün harita üzerindeki konumu GPS destekli açık erişimli haritalama siteleri ile belirlenmektedir. Traktörün santimetre seviyesinde lokasyonunun gösterilmesi ve kontrol edilebilmesi için diferansiyel GPS (DGPS) yönteminin kullanılması planlanmış ancak yüksek maliyetli donanım gereksiniminden dolayı protipe eklenememiştir. Akıllı Traktörün üzerine konumlandırılan Android işletim sistemine sahip tablette mobil uygulamamız konum belirlemesi yapmaktadır. Geliştirilen mobil uygulama Şekil 4 te gösterilmiştir. Traktörün otonom olarak tarlada gezinmesinin yanısıra, mobil uygulama üzerinden Bluetooth bağlantısı ile kablosuz olarak kontrol edilebilmektedir. Mobil uygulama ekranından traktörün ileri, geri, sağ ve sol gibi yönlendirilmesi yapılabilmektedir. Mobil uygulama üzerinde seçili alanda traktörün gezinmesi sağlanmakta ve bu süreçte traktör üzerinde bulunan ilaçlama sistemi ile zirai ilaçlama gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4. Akıllı traktör mobil uygulaması.

Figure 4. Smart tractor mobile application.

3. Bulgular

Üzerine eklenen donanımlar ile akıllı traktör haline gelen aracın test edilmesi için açık alanda tablet ile GPS sinyali alınarak test ortamı oluşturulmuştur. Test ortamı için traktörün

tekerleklerinin hareket edebileceği bir alan tercih edilmiştir. Tablet üzerinde çalıştırılan mobil uygulama ile traktörün konumu harita üzerinde tespit edilmiştir. Uygulama üzerinde, traktörün ilaçlama yapmak üzere gezeceği alan belirtilerek komut verilmiştir. Mobil uygulama, harita üzerindeki bilgileri işleyerek Bluetooth ile kontrol ünitesine bilgi göndermiş ve traktörün ileri, geri, sola ve sağa hareket ederek tarla içerisinde gezinmesini sağlamıştır. Bu sırada traktörün hareketleri gözlenmiştir. Geliştirilen sistemin avantajları düşünüldüğünde ise, tarlaların ilaçlama ve gübrelenmesinin bilgisayar kontrollü olarak yapılması, ilaçlama ve gübreleme dozajının ayarlanmasını daha verimli hale getirecektir. Aynı zamanda GPS üzerinden belirtilen konumlarda yapılan işlem ile doğru noktaların verimli bir şekilde ilaçlanması ve gübrelenmesi sağlanacaktır. İlaveten, yapılan ilaçlama ve gübreleme bilgilerinin bulut üzerine kaydedilmesi sayesinde, tarım alanlarında yapılan ilaçlama ve gübreleme hakkında envanter tutulması ve bilgilere anlık ulaşılması kolaylaşacaktır. Tasarlanan sistemin dezavantajları da bulunmaktadır. İlk olarak, önerdiğimiz sistemin kullanılması için kullanılan mevcut traktörlerde tadilat yapılması ve belirli elektronik donanımlara kavuşturulması gerekecektir. Özellikle traktörün kontrolünün sağlanması için direksiyon sisteminin üzerinde yapılacak değişiklik fazla olmasa da ek bir maliyet getirmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, tarlalardaki ilaçlama ve gübreleme işlemlerinin bilişim teknolojileri kullanarak otomatik bir şekilde yapılması amacıyla bir prototip geliştirilmiştir. Gaz ve fren pedalı ile çalışan akülü traktör üzerine eklenen donanımlar ile akıllı traktör oluşturulmuştur. Akıllı traktörün kullanım amacı, geliştirilen yazılım ve kullanılan IoT cihazlarının yardımı ile traktörün hareket ettirilerek ilaçlama ve gübreleme işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için, akıllı traktör üzerinde bulunan tablet GPS aracılığıyla konumu tespit etmekte ve Tarım Bakanlığı bulut sunucularından alınan ilaçlanacak ve gübrelenecek yer bilgisi kullanılarak traktörün hareketi sağlanmaktadır. Ayrıca akıllı traktör tarla üzerinde gezerek ilaçlama ve gübreleme işlemini gerçekleştirdikten sonra, işlem yapılan bölgenin bilgisini yine bulut sunucularına göndermektedir. Böylece bulut sunucularında bilgileri kayıtlı tarlaların ilaçlama ve gübreleme durumlarının güncelliği sağlanmaktadır. Akıllı traktör prototipi hazırlanırken, IoT cihazları kullanılarak kontrol ünitesi geliştirilmiş ve traktörün mekanik çalışma sistemine entegre edilmiştir. Ayrıca Android işletim sistemi üzerinde çalışan uygulama geliştirilerek, traktörün konumunun tespit edilmesi ve belirlenen alan içerisinde hareket ederek ilaçlama ve gübreleme yapılması sağlanmıştır. Mobil uygulama üzerinden yön tuşları kullanılarak traktörün uzaktan kontrol edilmesi de mümkündür. İleriki çalışmalarda, büyük tarlaların aynı zamanda birden fazla traktör ve benzeri otonom cihazlar ile ilaçlama ve gübreleme yapılabilmesi amacıyla, cihazların birbirleri ile haberleşmesinin sağlanması, daha kısa sürede ve daha verimli bir şekilde ilaçlama ve gübreleme yapılması için yazılımın geliştirilmesi düşünülmektedir. Aynı zamanda, Yapay Zeka teknolojileri kullanılarak farklı Makina Öğrenimi algoritmalarının karşılaştırılması ile tarlaların ilaçlama ve gübreleme işleminin optimum seviyede gerçekleştirilmesini sağlayacak en uygun algoritmanın seçimi için gerekli çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Sınıflandırılması. El-Cezeri, 9(4), 1450-1465. DOI : 10.31202/ecjse.1135807.

Teşekkür

Katkılarından dolayı Soner Öz, İlhan Gülsever, Büşra Çantaoglu ve Hasan Aydos'a teşekkür ederiz.

Yazar katkılarının beyanı

Hakan Dalkılıç: Analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması, yazım.

Mehmet Hilal Özcanhan: Fikir oluşturma, deney tasarımı, eleştirel inceleme.

Kaynaklar

- [1] Balaska, V., Adamidou, Z., Vryzas, Z., & Gasteratos, A. 2023. Sustainable Crop Protection via Robotics and Artificial Intelligence Solutions. *Machines*, 11(8), 774. DOI: 10.3390/machines11080774
- [2] Shaikh, T. A., Rasool, T., & Lone, F. R. 2022. Towards Leveraging the Role of Machine Learning and Artificial Intelligence in Precision Agriculture and Smart Farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107119
- [3] Türker, U., Akdemir, B., Topakçı, M., Tekin, B., Aydın, İ. Ü. A., Özoğul, G., Evrenosoğlu, M. 2015. Hassas Tarım Teknolojilerindeki Gelişmeler. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VIII. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı-1*, 295-320.
- [4] Aydın, N. 2022. Tarım Sektöründe Bilgi Teknolojileri. *Balkan & Near Eastern Journal of Social Sciences (BNEJSS)*, 8.
- [5] Kadioğlu, Y. 2016. Çarşamba Ovası Örneğinde Ekstrem Hava Olaylarının Ziraat Faaliyetleri Üzerindeki Etkisine Dair Bir Değerlendirme. *TÜCAUM Uluslararası Coğrafya Sempozyumu*, 13-14.
- [6] Meshram, A. T., Vanalkar, A. V., Kalambe, K. B., & Badar, A. M. 2022. Pesticide spraying robot for precision agriculture: A categorical literature review and future trends. *Journal of Field Robotics*, 39(2), 153-171. DOI: 10.1002/rob.22043
- [7] Özgüven, M. M., Altaş, Z., Güven, D., & Arif, Ç. A. M. 2022. Tarımda Drone Kullanımı ve Geleceği. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(1), 64-83.
- [8] Akkamaş, M., Çalışkan, S. 2020. İnsansız Hava Araçları ve Tarımsal Uygulamalarda Kullanımı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 8-16.
- [9] Villi, O., & Yakar, M. 2022. İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73-100. DOI: 10.51534/tiha.1189263
- [10] Özcan, Y. A., Sarraj S., İstanbullu A. 2020. Hassas Tarım İçin Sağlık Uygulaması Geliştirilmesi, *Journal of Scientific, Technology and Engineering Research*, 1(2): 33-39. DOI: 10.5281/zenodo.4088516
- [11] Dilay, Y., Hakkı, S. O. Y., Bayrak, M. 2012. Hassas Tarımda Kablosuz Algılayıcı Ağların Kullanımı ve Uygulama Alanlarının İncelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2(2, Ek: A), 21-26.
- [12] Kurt, C., Yılmaztürk, İ., Okur, F., Menemen, A., Bahtiyar, B., & İplikçi, S. 2022. Nesnelerin İnterneti Tabanlı Tarımsal Sulama Otomasyon Sistemi Geliştirilmesi, *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 149-153.
- [13] Comart, A., Oral, O., Çağlayan, N. 2018. Nesnelerin İnterneti Teknolojisinin Tarımsal Alandaki Uygulamaları. *International Refereed Journal of Engineering And Sciences*, 11. DOI: 10.17366/uhmfd.2018.2.3
- [14] Emekli, N. Y., Topakçı, M. 2009. Hassas Uygulamalı Tarım Teknolojilerinin Sulama Alanında Kullanımı. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 26(2), 9-17.
- [15] Qazi, S., Khawaja, B. A., & Farooq, Q. U. 2022. IoT-equipped and AI-enabled Next Generation Smart Agriculture: A Critical Review, Current Challenges and Future Trends. *IEEE Access*, 10, 21219-21235. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3152544.
- [16] Kadioğlu, U., Uçar, M. K., & Yıldırım, S. 2022. Tarımda Kaliteli Tohum Üretimi için Kuru Fasulye Türlerinin Yapay Zekâ Tabanlı



Inversion of Gravity Anomalies by a Hybrid Metaheuristic Algorithm

Gravite Anomalilerinin Hibrit Metasezgisel Algoritma ile Ters Çözümü

Sanam Hosseinzadeh ^{1*}, Gökhan Göktürkler ², Seçil Turan-Karaoğlan ²

¹ The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylül University, İzmir, TÜRKİYE

² Department of Geophysical Engineering, Faculty of Engineering, Dokuz Eylül University, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: sanam.hosseinzadeh@ogr.deu.edu.tr

Abstract

In this work, we introduce application of a hybrid algorithm (DE/PSO) to estimate the model parameters from residual gravity anomalies due to some simple geometrical bodies. This algorithm combines differential evolution (DE) and particle swarm optimization (PSO). To investigate the performance of the hybrid algorithm, test studies were carried out using synthetic and field data sets. The synthetic data sets include noise-free and noisy synthetic anomalies. Two published gravity anomalies from Cuba and Canada were used as the field data. In the hybrid algorithm, DE and PSO yield [premature] solutions separately and share their best solutions during an iterative process. An openly accessible metaheuristics package (*NMOF*) in R programming environment was used to implement the hybrid algorithm. Through simulations using synthetic anomalies, DE/PSO algorithm was successful to provide improved results. In comparison to the solutions from the single algorithms (DE and PSO), the DE/PSO algorithm shows more effectiveness in terms of accuracy and convergence. The true model parameters of noise-free and noisy synthetic gravity anomalies were recovered well by the hybrid algorithm. The results of inversion for the field examples are characterized by low residual values between the observed gravity anomalies and the calculated ones.

Keywords: Differential evolution, particle swarm optimization, hybrid metaheuristic, gravity anomaly, geophysics

Öz

Bu çalışmada, basit geometrik şekilli cisimlerden kaynaklanan rezidüel gravite anomalilerin model parametrelerinin kestirimi için bir hibrit algoritmanın (DE/PSO) uygulaması sunulmaktadır. Bu algoritma, Farksal Evrim (DE) ve Parçacık Sürü Optimizasyonunu (PSO) birleştirmektedir. Hibrit algoritmanın performansını araştırmak için kuramsal ve arazi veri setleri kullanılarak test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kuramsal veri setleri, gürültüsüz ve gürültülü sentetik anomalileri içermektedir. Arazi verileri ise literatürde yer alan Küba ve Kanada gravite anomalileridir. Hibrit algoritmada, DE ve PSO algoritmaları ayrı ayrı [ilkkel] çözümler üreterek tekrarlı bir süreç boyunca en iyi çözümlerini paylaşmaktadır. Hibrit algoritmayı gerçekleştirmek için R programlama ortamında açık erişimli bir metasezgisel paket (*NMOF*) kullanılmıştır. DE/PSO algoritması, kuramsal anomalilerin kullanıldığı simülasyonlarda, iyileştirilmiş sonuçlar sağlamada başarılı olmuştur. Her bir algoritmadan (DE ve PSO) gelen çözümlerle karşılaştırıldığında, DE/PSO algoritmasının, doğruluk ve yakınsama açısından daha etkili olduğu görülmüştür. Gürültüsüz ve gürültülü kuramsal gravite anomalilerinin doğru model parametreleri, hibrit algoritma tarafından daha iyi bir şekilde kestirilmiştir. Arazi örnekleri için ters çözüm sonuçları, gözlenen ve hesaplanan gravite anomalileri arasında düşük hata değerlerine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Farksal evrim, parçacık sürü optimizasyonu, hibrit metasezgisel, gravite anomalisi, jeofizik

1. Introduction

Gravity field's variations along the Earth's surface are due to variations of density in the subsurface. Then, gravity anomalies are the result of anomalous density structures. Inversion of gravity anomalies is widely used in geophysics to interpret subsurface structures. In this study, we try to solve a small-scale inversion problem, which interprets residual gravity anomalies due to bodies having simple geometric shapes such as horizontal cylinder, vertical cylinder, and sphere. Derivative-based algorithms have been widely used in the inversion of gravity data. However, some disadvantages are highlighted in the literature for the derivative-based methods. These methods are prone to be trapped in local minima. The results from derivative-based methods strongly depend on the initial model. This means that a good initial model is an essential to reach the global minimum, which is not available in most of the case studies. Recent global

search methods (metaheuristics) inspired by nature have been introduced to overcome the drawbacks of the derivative-based methods. Although the considerable computational effort is the most important disadvantage of metaheuristics, these algorithms continue to be preferred for addressing optimization problems. The reason for that is their success to avoid local minima. In addition, these algorithms get to the global minimum without depending on the initial model [1,2,3]. A variety of metaheuristics has been implemented to solve geophysical inverse problems. Some examples in the literature for inversion of gravity anomalies include differential evolution-DE [e.g. 4-6], particle swarm optimization-PSO [e.g. 7,8], very fast simulated annealing-VFSA [e.g. 9], backtracking search optimization-BSO [10], and success-history-based adaptive differential evolution-SHADE [11].

A wide application of metaheuristics to different optimization problems lead to further studies to develop new strategies for the algorithms' modifications. Hybridization is one of the attempts to improve metaheuristics. Hybridization includes combination of metaheuristics with local search algorithms, or with other metaheuristics. Because the strong aspects of the combined algorithms are magnified while their weak aspects are lessened, hybrid algorithms show a better performance [12-14]. Some recent examples of hybrid algorithms for inverting potential-field anomalies comprised DE and PSO [15,16], PSO and evolution strategies (ES) [17], GA and PSO [18], and genetic-price hybrid algorithm (GPA) proposed by Di Maio et al. [19-21].

According to our survey on the literature, inversion of gravity anomalies has been rarely addressed by DE and PSO hybridization. This study tests a hybrid algorithm called DE/PSO to invert gravity anomalies. Both PSO and DE are well-known and popular algorithms widely used to solve optimization problems. The disadvantage of slow convergence has been reported for PSO [e.g. 22,23] and some studies have reported that DE performance is highly sensitive to control parameters selection [e.g. 24,25]. The DE/PSO hybrid gives an opportunity to exploit both algorithms for more accurate results by minimizing their possible disadvantages.

In the DE/PSO hybrid we used, self-contained DE and PSO search their own spaces while sharing their information in parallel. We executed the DE/PSO hybrid algorithm using a metaheuristics package called *NMOF* [26] applicable in the environment of R programming language [27]. R is an open source released under the terms of the GNU General Public License.

2. The DE/PSO Hybrid Algorithm

DE is a stochastic vector-based metaheuristic algorithm consisting of two phases. The first phase is to initialize a random population. The second phase is to evolve the population through mutation, crossover and selection operations. The second phase repeats and a solution is obtained where a termination criterion (e.g. to reach a certain number of generations) is satisfied. The reader can refer to [28], [29], and [30] for more explanation of the algorithm scheme. DE algorithm has two user-defined control parameters to be optimized: *F* as the parameter for mutation constant and *Cr* as the parameter for crossover probability.

PSO first introduced by [31] is inspired by the swarming behavior of birds or fishes as they look for sources of food. The procedure of PSO algorithm can be defined in two main steps: starting with a population of particles with random positions, then the positions of the particles are updated iteratively. The iterative process continues until a pre-defined condition, such as reaching a certain number of generations, is met. PSO is controlled by three parameters: ω (inertia weight) as weighting factor ($0 < \omega < 1$); c_1 and c_2 as cognitive and social scaling factors in the range of [0, 1]. The reader can refer to [31], and [32] for more details related to PSO algorithm.

Following the hybrid algorithm suggested by (15), we used a DE/PSO algorithm in this study. In a similar scheme, our used algorithm starts with two different N_{gen}^{DE} number of generations. DE obtains a [premature] solution after N_{gen}^{DE} number of generations. PSO also obtains its [premature] solution after N_{gen}^{PSO} number of generations. At this point, the hybrid algorithm picks the best individual, which is the one with less objective function value, between these two solutions. In each iteration, the best individual enters the next generations of DE and PSO. The optimum solution is the final best individual where the hybrid iteration number meets a user-defined maximum iteration number (It_{max}). All the control parameters of DE (*F*, and *Cr*) and PSO (ω , c_1 , and c_2) are

involved in the hybrid algorithm. In addition, the main parameters that tune the hybrid algorithm are population size (N_{pop}), the number of generations per each algorithm (N_{gen}^{DE} , N_{gen}^{PSO}), and It_{max} . The hybrid scheme introduced by [15] exchanges the information of the first generations obtained by DE and PSO. On the other hand, the hybrid algorithm introduced in present study was designed to share the information of *N*th generations ($N \geq 2$) obtained by DE and PSO.

The flowchart in Fig. 1 illustrates DE/PSO hybrid algorithm. *i*) The algorithm begins with determination of optimum values for DE, PSO, and DE/PSO including *F*, *Cr*, ω , c_1 , c_2 , N_{pop} , N_{gen}^{DE} , N_{gen}^{PSO} , and It_{max} . *ii*) DE and PSO initialize with different populations (pop_{DE} and pop_{PSO}) of size N_{pop} . *iii*) PSO yields a [premature] solution of N_{gen}^{PSO} th generation. *iv*) DE yields a [premature] solution of N_{gen}^{DE} th generation. *v*) Solutions obtained from DE and PSO are compared based on OF_{DE} (objective function of DE solution) and OF_{PSO} (objective function of PSO solution). The one with smaller objective function value is determined as the best individual. Then, the best individual is carried to the next generation by updating pop_{DE} or pop_{PSO} . *vi*) The algorithm ends if the iteration number gets to It_{max} . If not, it repeats from step (*iii*). In our coding implementation, PSO and DE run in a serial order. On the other hand, they can be implemented simultaneously by parallel programming tools.

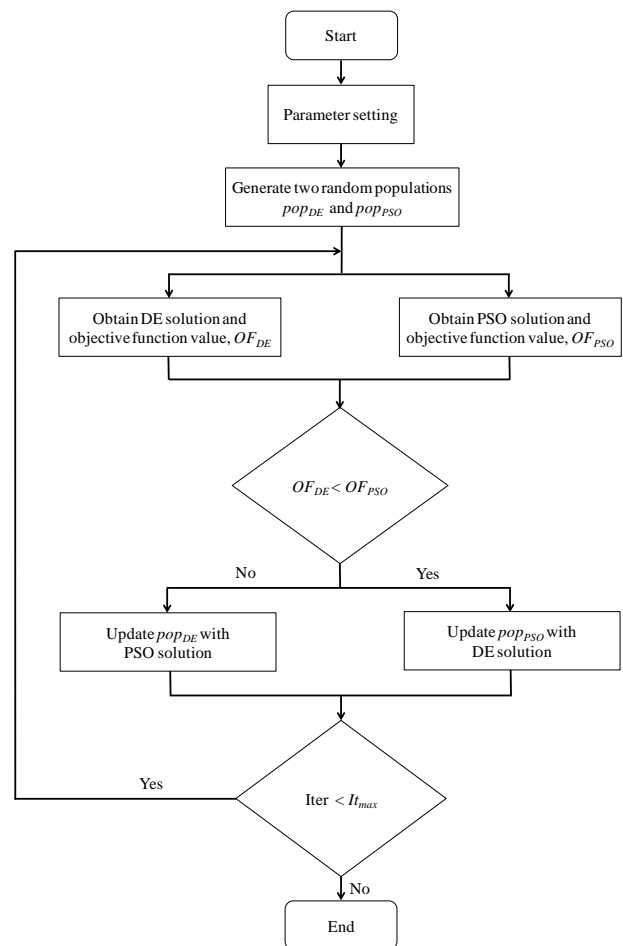


Figure 1. Flowchart of DE/PSO [after 15].

3. Gravity Anomaly

A body in subsurface with a simple geometric shape (sphere, a semi-infinite vertical cylinder or an infinitely long horizontal cylinder) produces gravity anomaly along a profile. At each point of the profile, the following formula gives gravity [mGal] [33,4,34]:

$$g(x, A, z_0, q, \eta, x_0) = A \frac{z_0^\eta}{[(x - x_0)^2 + z_0^2]^q} \quad (1)$$

In this equation, x [m] is horizontal distance, A [mGal m^{2q-η}] is the amplitude coefficient, z_0 [m] and x_0 [m] are the depth of the subsurface body, and its location respectively; and q and η denote dimensionless shape factors. Inversion of gravity anomaly goals to obtain estimations for the model parameters $A, z_0, q, \eta,$ and x_0 . The shape factors (q, η) for a semi-infinite vertical cylinder, infinitely long horizontal cylinder, and sphere respectively are (0.5, 0), (1, 1), and (1.5, 1).

4. Synthetic Data

A gravity profile along 240 m was produced synthetically with points spaced at 2-m intervals using Eq. 1. The subsurface body was assumed as an infinitely long horizontal cylinder with model parameters of $A = 250$ mGal m, $z_0 = 50$ m, $q = 1, \eta = 1,$ and $x_0 = 120$ m. The gravity anomaly is symmetric and shows a maximum around 5 mGal (Fig. 2). Parameter tunings of DE, PSO, and DE/PSO were carried out using this noise-free synthetic data. Then, we tested DE/PSO hybrid algorithm on noise-free and noisy gravity anomalies. In order to generate a noisy gravity data (Fig. 4), we added pseudo-random numbers with normal distribution having zero mean and standard deviation of ± 0.25 mGal [35] to the noise-free gravity data.

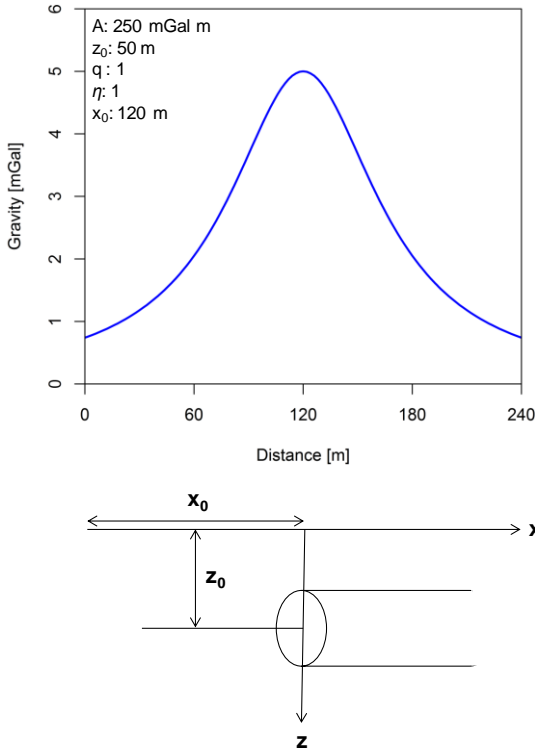


Figure 2. The noise-free synthetic gravity anomaly and the corresponding model parameters for an infinitely long horizontal cylinder.

5. Tuning of DE/PSO Control Parameters

To determine the optimum control parameters involved in the hybrid algorithm, the first step was to tune DE and PSO separately. We implemented each algorithm with fixed population number of 50, and generation number of 100 through synthetic noise-free data set. Each algorithm was executed 10 times, and then the best solution was selected based on the statistical information of the results. The statistical information includes the minimum, maximum, mean, and standard deviation (SD) of root mean square (rms) values, and the mean execution time. It is worth to mention that the parameter tuning, and test studies were implemented in computer with 2.4 GHZ processor and 4 GB of memory. The square root of calculated error energy (E) gives rms value (2):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (g_i^{obs} - g_i^{cal})^2 \quad (2)$$

This formula gives error energy for N number of data. For each observation point marked by i, g_i^{obs} is the observed data (synthetic or field), while g_i^{cal} is the calculated data.

We considered combinations of F and Cr from [0.4, 0.9] with a step of 0.1 to achieve the optimum for DE control parameters (Table 1). Five different sets of $\omega, c_1,$ and c_2 from some previous works were considered to find the optimum for PSO control parameters (Table 2, 3). The optimum control parameters of $F, Cr, \omega, c_1,$ and c_2 achieved for DE and PSO were respectively 0.4, 0.9, 0.729, 2.041, and 0.948.

DE/PSO control parameters are $N_{pop}, It_{max},$ and $(N_{gen}^{DE}, N_{gen}^{PSO})$. Trial-and-error through the noise-free data set indicated that $(N_{gen}^{DE}, N_{gen}^{PSO})$ are the most effective parameters that influence the accuracy and the rate of convergence. With fixed N_{pop} of 50, and It_{max} of 100, we obtained the results for several values of 1, 2, 3, and 4 for the parameters $(N_{gen}^{DE}, N_{gen}^{PSO})$. As we can see in Table 4, the rms and SD values decreases with respect to the increasing $(N_{gen}^{DE}, N_{gen}^{PSO})$ parameters. The increasing elapsed time is a result of the sequential execution of PSO and DE. It is avoidable with parallel programming approach. The optimum value selected for the parameters $(N_{gen}^{DE}, N_{gen}^{PSO})$ was 3 as it yielded a satisfactory result in terms of rms, and SD values.

Table 1. Tuning of DE control parameters.

F	Cr	Model Parameters					rms [mGal]				Mean Elapsed Time [s]
		A [mGal.m ^{2q-η}]	z ₀ [m]	q	η	x ₀ [m]	Min	Max	Mean	SD	
0.4	0.4	248.69	48.30	0.95	0.90	119.93	0.01	0.07	0.04	0.02	0.82
	0.5	296.25	52.24	1.05	1.07	120.01	0.01	0.07	0.04	0.01	0.44
	0.6	255.79	48.66	0.97	0.93	120.06	0.009	0.04	0.02	0.01	0.63
	0.7	278.73	50.07	0.99	0.97	119.98	0.005	0.03	0.02	0.008	0.62
	0.8	271.24	50.04	1.00	0.98	120.00	0.001	0.006	0.003	0.001	0.49
	0.9	331.92	49.98	1.00	0.93	120.00	1x10⁻⁴	7x10⁻⁴	3x10⁻⁴	2x10⁻⁴	0.46
0.5	0.4	178.34	53.96	1.10	1.31	119.71	0.03	0.09	0.05	0.02	0.47
	0.5	222.67	48.77	0.97	0.96	120.00	0.02	0.08	0.05	0.02	0.65
	0.6	230.87	50.98	1.03	1.09	119.93	0.01	0.06	0.03	0.01	0.47
	0.7	279.82	49.08	0.99	0.94	119.85	0.01	0.03	0.02	0.007	0.60
	0.8	294.30	49.68	1.00	0.94	120.04	0.002	0.02	0.01	0.005	0.64
	0.9	226.84	50.01	1.00	1.02	120.00	2x10 ⁻⁴	0.002	0.001	6x10 ⁻⁴	0.49
0.6	0.4	333.35	49.23	0.97	0.86	119.53	0.03	0.09	0.06	0.02	0.61
	0.5	113.84	44.80	0.91	1.01	119.52	0.05	0.10	0.07	0.02	0.63
	0.6	137.77	50.40	1.00	1.16	120.05	0.01	0.06	0.04	0.02	0.51
	0.7	309.05	47.55	0.94	0.81	119.81	0.02	0.06	0.04	0.02	0.59
	0.8	257.79	50.56	1.00	1.01	119.90	0.006	0.04	0.02	0.01	0.52
	0.9	361.97	49.85	1.00	0.90	120.00	0.004	0.03	0.01	0.008	0.62
0.7	0.4	135.11	50.55	1.01	1.18	120.09	0.01	0.11	0.07	0.02	0.47
	0.5	142.39	46.53	0.92	0.96	120.07	0.03	0.09	0.06	0.01	0.65
	0.6	152.42	48.48	0.96	1.04	120.30	0.02	0.14	0.07	0.03	0.64
	0.7	349.47	49.60	0.97	0.85	119.90	0.02	0.07	0.05	0.01	0.51
	0.8	333.22	50.43	1.01	0.96	120.02	0.009	0.09	0.04	0.02	0.51
	0.9	307.65	51.35	1.03	1.02	119.98	0.01	0.04	0.02	0.01	0.63
0.8	0.4	258.28	47.21	0.94	0.85	120.22	0.04	0.14	0.08	0.03	0.49
	0.5	237.26	54.24	1.05	1.13	120.57	0.06	0.13	0.09	0.02	0.51
	0.6	269.52	57.65	1.16	1.34	118.89	0.06	0.13	0.10	0.02	0.47
	0.7	324.24	49.99	0.98	0.90	119.99	0.02	0.14	0.08	0.03	0.50
	0.8	353.55	48.34	0.98	0.88	119.88	0.04	0.08	0.06	0.01	0.63
	0.9	321.50	49.12	0.97	0.86	120.23	0.02	0.07	0.04	0.01	0.47
0.9	0.4	198.68	44.08	0.88	0.80	119.41	0.06	0.17	0.10	0.03	0.64
	0.5	253.87	58.57	1.15	1.33	120.00	0.07	0.16	0.11	0.02	0.52
	0.6	249.88	55.93	1.17	1.36	119.18	0.05	0.15	0.10	0.03	0.47
	0.7	256.21	45.63	0.87	0.72	119.60	0.06	0.20	0.11	0.05	0.62
	0.8	293.75	56.99	1.20	1.39	120.54	0.05	0.13	0.09	0.02	0.57
	0.9	329.49	50.37	1.00	0.94	120.64	0.03	0.12	0.07	0.03	0.62

Table 2. PSO control parameter sets from some previous studies.

Coefficients	Reference	Inertia Weight	Cognitive Scaling Factor	Social Scaling Factor
Set 1	[31]	1	2	2
Set 2	[42]	0.729	1.494	1.494
	[43]			
Set 3	[44]	0.6	1.7	1.7
	[45]			
Set 4	[46]	0.729	2.041	0.948
Set 5	[47]	0.715	1.7	1.7

Table 3. Tuning of PSO control parameters.

Coefficients	Model Parameters					rms [mGal]				Mean Elapsed Time [s]
	A [mGal.m ^{2q-η}]	z ₀ [m]	q	η	x ₀ [m]	Min	Max	Mean	SD	
Set 1	281.73	46.17	0.85	0.64	21.75	0.11	0.25	0.16	0.05	0.65
Set 2	265.52	50.63	1.02	1.02	119.99	0.005	0.13	0.06	0.05	0.63
Set 3	300.69	52.12	1.05	1.06	120.00	0.01	0.05	0.02	0.01	0.51
Set 4	224.50	50.58	1.01	1.05	120.01	0.004	0.09	0.05	0.03	0.65
Set 5	266.57	52.77	1.06	1.13	119.97	0.02	0.13	0.05	0.04	0.52

Table 4. Tuning of DE/PSO hybrid algorithm.

Algorithm	N_{gen}^{DE} N_{gen}^{PSO}	Model Parameters					rms [mGal]				Mean Elapsed Time [s]
		A [mGal.m ^{2q-η}]	z ₀ [m]	q	η	x ₀ [m]	Min	Max	Mean	SD	
Hybrid	1	244.43	50.10	1.00	1.01	119.99	8x10 ⁻⁵	0.002	0.0005	0.0006	0.76
	2	244.67	49.99	1.00	1.00	120.00	5x10 ⁻⁸	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁶	1.15
	3	249.13	49.99	1.00	1.00	120.00	2x10⁻⁹	8x10⁻⁷	1x10⁻⁷	2x10⁻⁷	1.48
	4	237.62	49.99	1.00	1.01	120.00	2x10 ⁻¹⁰	3x10 ⁻¹⁰	2x10 ⁻¹⁰	2x10 ⁻¹³	1.86

6. DE/PSO Hybrid Algorithm Performance

6.1. Synthetic Data

DE/PSO hybrid algorithm was implemented on noise-free and noisy synthetic data sets. For each set of the synthetic data, the algorithm was executed 10 times, and then the best solution was selected based on the rms value of the results. Table 5 includes the estimations with the corresponding rms values, true model

parameters, and the search space (determined by trial-and-error). Fig. 3 and 4 show the fit between the observed and calculated gravity anomalies, observed versus calculated data, and the convergence of the error energy. The convergence plots show the first 50 iterations for better resolution. For noise-free data, the estimations are close to true model parameters. For noisy data, the rms value agrees with the standard deviation of the noise, which was added (± 0.25 mGal).

Table 5. Test results through synthetic data inversion.

Model Parameters	True Values	Parameter Bounds		Estimated Parameters	
		Minimum	Maximum	Noise-free	Noisy
A [mGal.m ^{2q-η}]	250	50	500	249.13	278.37
z ₀ [m]	50	1	150	49.99	51.87
q	1	0	2	1.00	1.04
η	1	0	2	1.00	1.07
x ₀ [m]	120	50	200	120.00	119.73
rms [mGal]	-	-	-	1.71x10 ⁻⁹	0.24

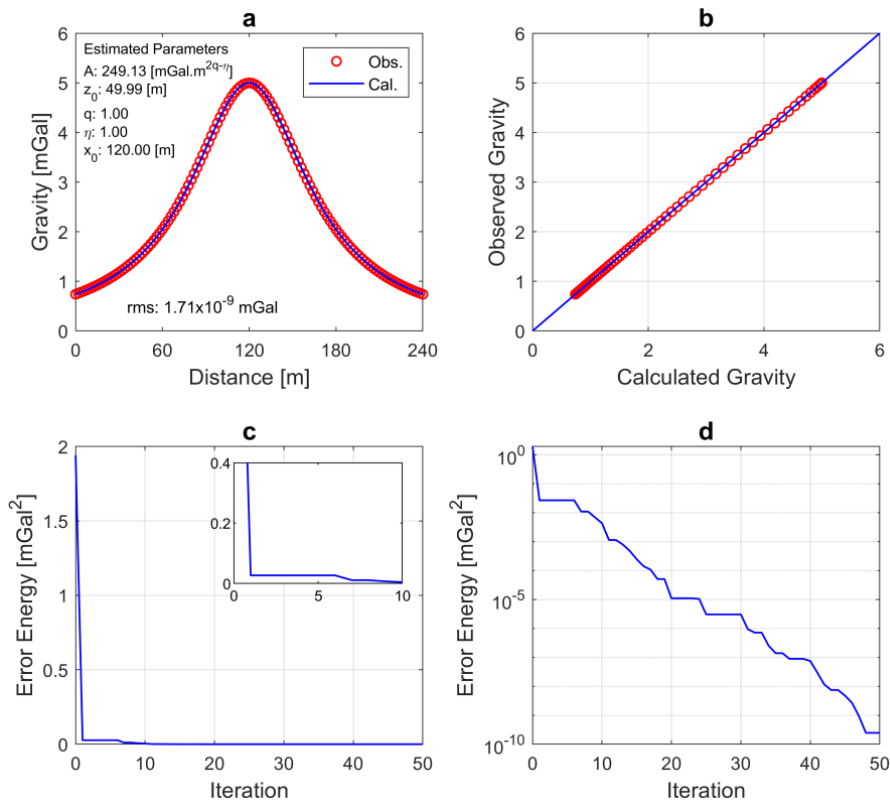


Figure 3. Results from noise-free gravity data including, (a) fit between the observed and calculated data, (b) observed versus calculated data, (c) convergence of the error energy, and (d) convergence of the error energy in logarithmic scale.

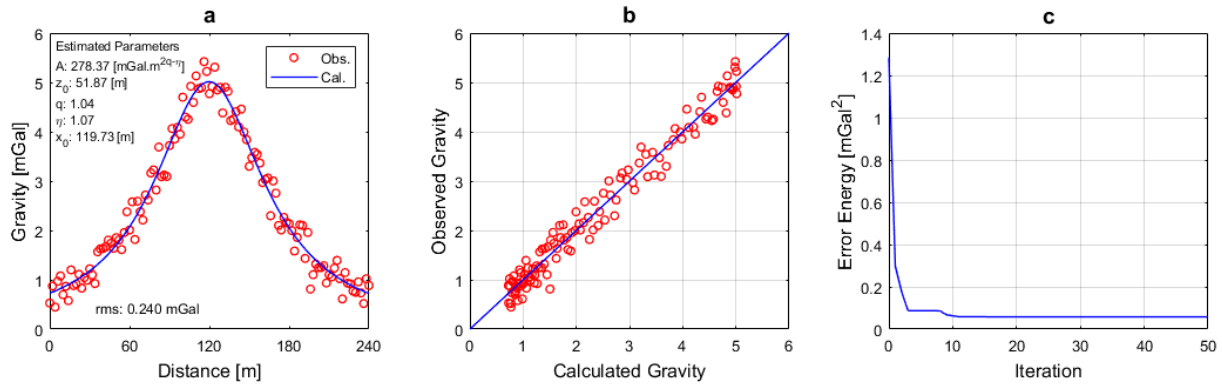


Figure 4. Results from noise-free gravity data including, (a) fit between the observed and calculated data, (b) observed versus calculated data, and (c) convergence of the error energy.

The performance of DE, PSO, and DE/PSO algorithms were compared by using the same parameter values. The value of 100 was assigned for iteration number (It_{max}) and generation number. The three algorithms start with the same initial population size of 50 (Table 6, Fig. 5). According to Table 6, the DE/PSO algorithm yields results with small values of rms and SD in the case of noise-free data. Further investigations to compare the performances of

the three algorithms were done through the convergence rate of the three algorithms for noise-free and noisy data. This comparison was based on the necessary iteration/generation numbers for each algorithm to reach the rms value less or equal to 0.01 mGal. The hybrid algorithm requires 19 iterations to reach that threshold rms value, while DE and PSO respectively require 71 and 100 generations.

Table 6. Comparison of DE/PSO, DE, and PSO results through synthetic data inversion.

Synthetic Data	Algorithm	Model Parameters					rms [mGal]				Mean Elapsed Time [s]
		A [mGal.m ^{2q-η}]	z ₀ [m]	q	η	x ₀ [m]	Min	Max	Mean	SD	
Noise-Free	Hybrid	249.13	49.99	1.00	1.00	120.00	2x10 ⁻⁹	8x10 ⁻⁷	1x10 ⁻⁷	2x10 ⁻⁷	1.48
	DE	241.52	49.93	0.99	1.00	119.98	0.001	0.008	0.003	0.002	0.50
	PSO	231.31	49.29	0.99	0.99	119.95	0.008	0.07	0.04	0.02	0.61
Noisy	Hybrid	278.37	51.87	1.04	1.07	119.73	0.24	0.24	0.24	2x10 ⁻¹⁴	1.49
	DE	214.94	51.92	1.05	1.14	119.74	0.24	0.24	0.24	1x10 ⁻¹⁰	0.53
	PSO	220.64	57.29	1.17	1.39	119.95	0.24	0.28	0.25	0.01	0.47

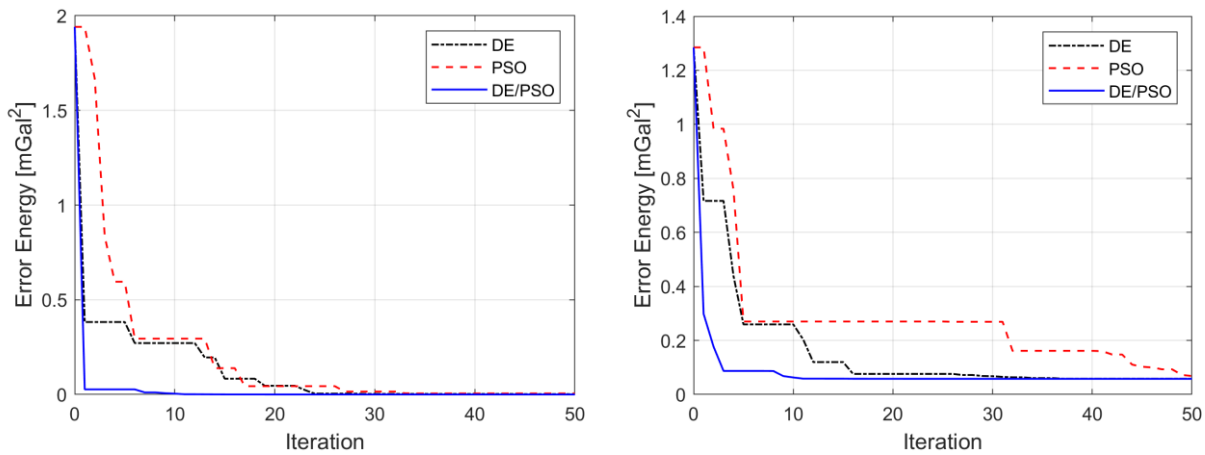


Figure 5. DE/PSO, DE, and PSO convergence rate through noise-free data (left) and noisy data (right) inversion. The plots illustrate 50 iterations for a zoomed-in view of the comparison.

During the test studies, an additional research was done about the success rate of DE and PSO to get the best individual in each iteration of the DE/PSO. According to the investigation, the average success rate of DE and PSO are respectively around %65 and %35 in the test with noise-free data. The values are around %66 and %34 in the test with noisy data.

Prior to inverting the gravity anomalies, error energy maps were generated to examine the solvability of the model parameters addressed in the current inverse problem (36,5,30). Fig. 6 shows the error energy maps for some pairs of the model parameters. Each map is produced by calculating the error energy values (Eq. 2) over the ranges of the associated parameter pair within the search space. Due to the non-uniqueness of the inverse problems, it is acknowledged that there are multiple models that can fit the

data well. Then, the error energy map shows topography that the true model parameters (global minimum) are placed in the location of the lowest error energy value. According to the literature, the shape of contour lines on the topography provides interpretations about the uniqueness in estimating the model parameter. *i)* Closed circular and elliptical contours parallel to any axis (Fig. 6. a-c) represent parameters that are uncorrelated. This suggests that the values of these parameters can be independently obtained. *ii)* Elliptic contours which are angled with one of the axes (Fig. 6. d-f) indicate a correlation between parameters. Despite this correlation, the parameters can still be

solved individually. *iii)* Sloping unclosed elliptical contours exhibit a broad region characterized by low errors suggesting the presence of numerous equivalent solutions. This contour shape implies the difficulty in uniquely estimating the related parameters (Fig. 6. g-i). Fig. 6 also shows the locations of the model parameters estimated using the hybrid algorithm for both noise-free and noisy synthetic data. The close proximity of the estimations to the true parameters (global minimum) indicates that the hybrid algorithm has successfully estimated the model parameters.

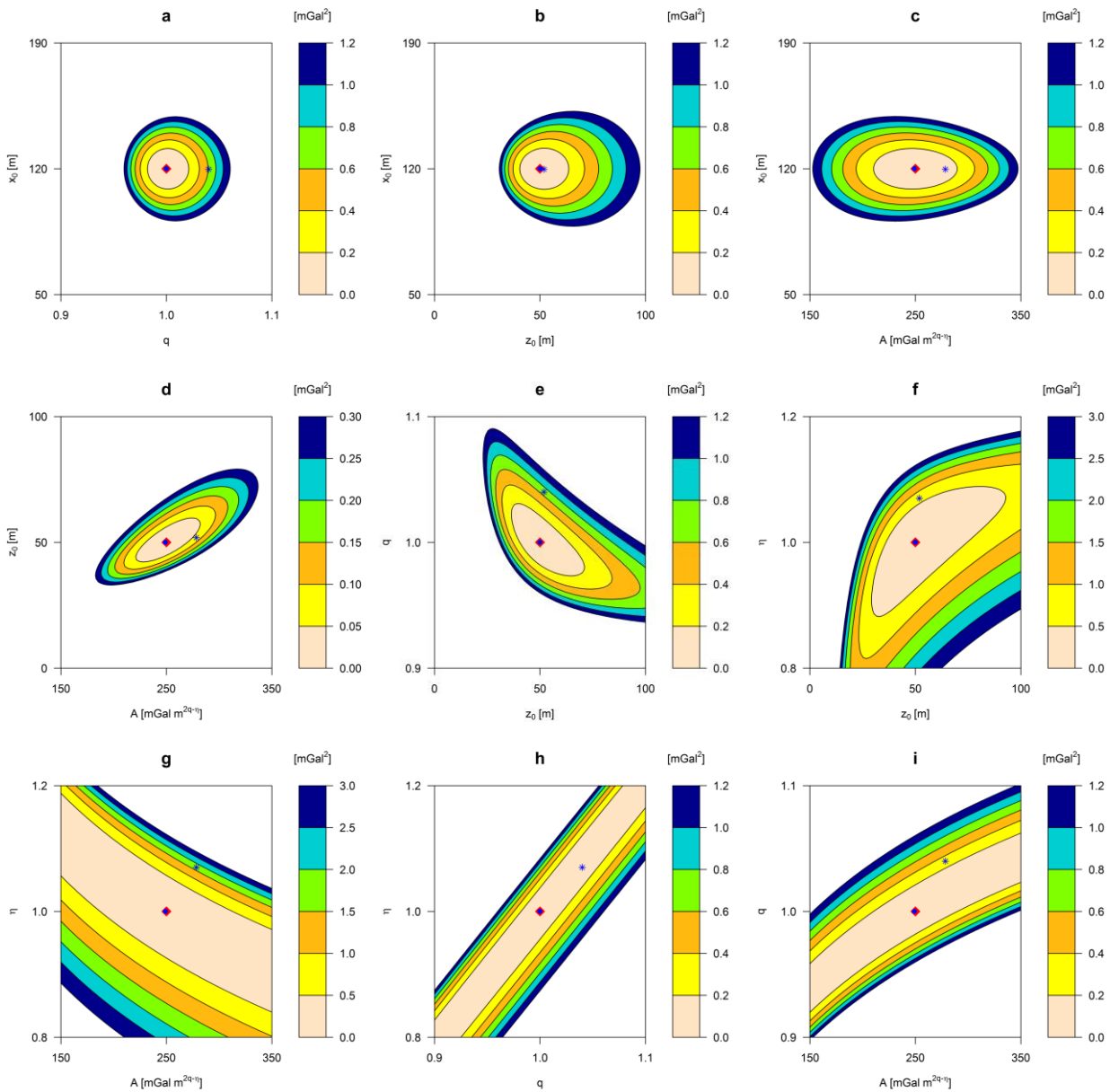


Figure 6. The generated error energy maps for the current inverse problem. The global minimum (red diamond), the model parameters estimated using the DE/PSO algorithm for noise-free (blue circle), and noisy data (blue star) are marked in each map.

6.2. Field Data

In the test with field data, we assigned 200 for N_{pop} , 400 for It_{max} , and 3 for $(N_{gen}^{DE}, N_{gen}^{PSO})$ parameters to obtain the results. These values for the parameters have been chosen based on trial-and-error. The selection of the best solution was carried out similarly to the test with synthetic data, involving 10 independent executions.

6.2.1. Camaguey anomaly (Cuba)

The first data set used as field example was the normalized residual gravity anomaly measured over a chromite deposit in Camaguey province (Cuba) [37]. In Fig. 7, the gravity anomaly is shown along a 120 m profile with a maximum amplitude around 0.2 mGal. We considered the search space following [4,34], except for the q parameter ($A \in [1, 10000]$, $z_0 \in [1, 100]$, $\eta \in [0, 1]$, $x_0 \in$

$[0, 120]$, and $q \in [0, 2]$). Fig. 7 also shows the results estimated by the hybrid algorithm. The convergence plot shows the first 50 iterations for better resolution. Based on the information presented in Table 7, the DE/PSO hybrid algorithm has yielded

parameters consistent with those estimated through various methods in prior studies.

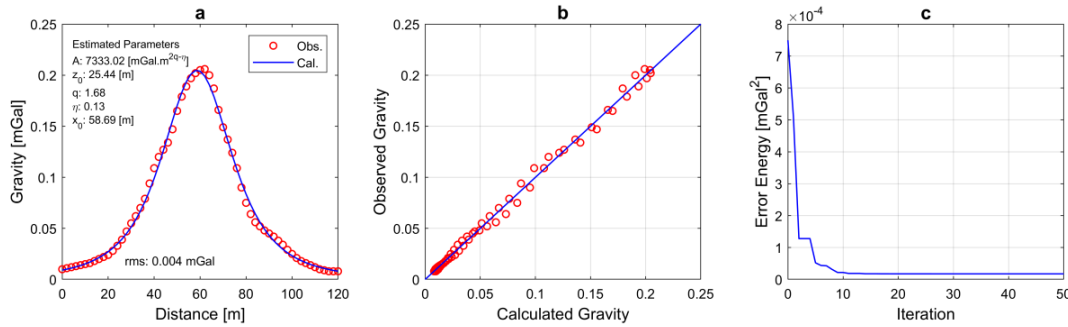


Figure 7. Results from the Cuba anomaly, (a) fit between the observed and calculated data, (b) observed versus calculated data, and (c) convergence of the error energy.

Table 7. Test results through field data (Cuba anomaly) inversion.

Parameters	[38]	[4]	[39]	[34]	[40]	Present Study
	Neural Network	DE	DE	CSA	PSO	DE/PSO
A [mGal·m ^{2q-η}]	9382.52	288.25	175.02	1430.30	408.25	7333.02
z ₀ [m]	21.14	23.23	23.23	23.30	21.15	25.44
q	1.54	1.5	1.5	1.49	1.47	1.68
η	-	0.71	0.86	0.18	-	0.13
x ₀ [m]	-	58.73	58.73	58.72	0.63	58.69
rms [mGal]	-	0.0043	0.0043	0.00431	0.01	0.0042

6.2.2. Quebec anomaly (Canada)

The second data set used as field example was the normalized residual gravity anomaly measured over a sulfide ore body in Quebec (Canada) [41]. In Fig. 8, the gravity anomaly is shown along a 240 m profile with a maximum amplitude around 1.7 mGal. We considered the search space following [4,34], except for

the q parameter ($A \in [1, 10000]$, $z_0 \in [1, 100]$, $\eta \in [0, 1]$, $x_0 \in [0, 240]$, and $q \in [0, 2]$). Fig. 8 also shows the results estimated by the hybrid algorithm. The convergence plot shows the first 50 iterations for better resolution. Based on the information presented in Table 8, the DE/PSO hybrid algorithm has yielded parameters consistent with those estimated through various methods in prior studies.

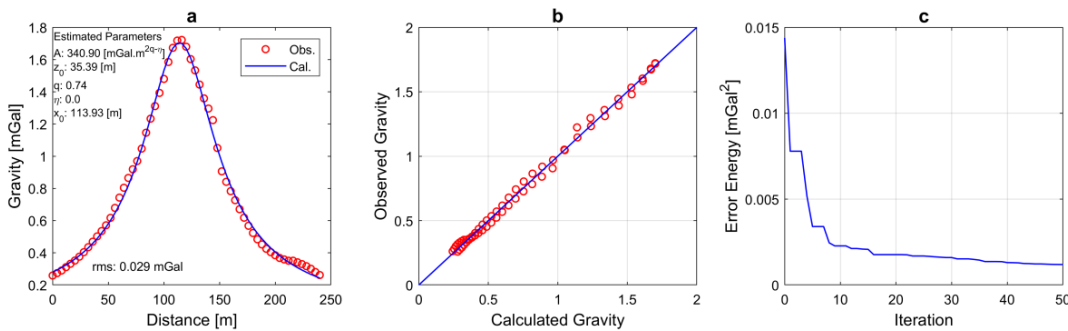


Figure 8. Results from the Canada anomaly including, (a) fit between the observed and calculated data, (b) observed versus calculated data, and (c) convergence of the error energy.

Table 8. Test results through field data (Canada anomaly) inversion.

Parameters	[38]	[4]	[34]	[40]	Present Study
	Neural Network	DE	CSA	PSO	DE/PSO
A [mGal·m ^{2q-η}]	200.11	299.11	204.04	38.51	340.90
z ₀ [m]	29.15	35.39	40.32	21.53	35.39
q	0.69	0.74	0.92	0.49	0.74
η	-	0.04	0.23	-	0.002
x ₀ [m]	-	113.93	113.66	1.11	113.93
rms [mGal]	-	0.029	0.0334	0.03	0.029

7. Conclusions

In this study, a combination of DE and PSO was applied to gravity anomalies due to some simple geometrical bodies. DE and PSO algorithms were combined as a DE/PSO hybrid algorithm to share their best [premature] solutions in an iterative process. Considering simulations with the synthetic data, the hybrid algorithm successfully obtained results that closely approximated the true model parameters. Compared to DE and PSO, the hybrid algorithm generated results that are more accurate in terms of rms or SD values. The hybrid algorithm also speeded up the convergence rate compared to the ones of DE and PSO. Considering test studies with the field data sets, a good agreement between calculated and observed gravity anomalies from Cuba and Canada indicated that the hybrid algorithm was also successful to obtain the model parameters. Another conclusion worth to mention is the successful applicability of R programming language together with various available R packages to geophysical optimization problems.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

This article does not require ethics committee approval.

This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

Acknowledgment

As the authors, we are grateful to the Editor and two anonymous reviewers for their comments and suggestions, which contributed significantly to the improvement of the manuscript. The DE/PSO algorithm was performed by using R programming language. MATLAB® software (<http://www.mathworks.com/>) was also used to create some of the figures. This study is part of the PhD thesis of S. Hosseinzadeh.

Author Contribution Statement

Author 1 (corresponding author) conducted the literature review, wrote the manuscript focusing on conceptualization and results presentation, and developed and implemented the code used in this study. Author 2 supervised the simulation studies, contributed to writing and editing processes, and conducted a critical review offering feedback for improvement. Author 3 contributed to conduct the literature review, provided key insights for the study's theoretical framework, created visual representations, contributed to synthetic dataset generation and editing processes.

References

- [1] Blum, C., Roli, A. 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys*, 35(3), 268-308. <https://doi.org/10.1145/937503.937505>.
- [2] Göktürkler, G. 2011. A hybrid approach for tomographic inversion of crosshole seismic first-arrival times. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8(1), 99-108. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/8/1/012>.
- [3] Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Ekinci, Y.L., Turan, S. 2016. Metaheuristics in applied geophysics (in Turkish). *Pamukkale Univ. Journal of Engineering Sciences*, 22(6), 563-580. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.81904>.
- [4] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Turan, S. 2016. Model parameter estimations from residual gravity anomalies due to simple-shaped sources using differential evolution algorithm. *Journal of Applied Geophysics*, 129, 133-147. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.040>.
- [5] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Özyalın, Ş. 2021. Gravity data inversion for the basement relief delineation through global optimization: a case study from the Aegean Graben System, western Anatolia, Turkey. *Geophysical Journal International*, 224(2), 923-944. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa492>.
- [6] Roy, A., Dubey, P. C., Prasad, M. 2021. Gravity inversion for heterogeneous sedimentary basin with b-spline polynomial approximation using differential evolution algorithm. *Geophysics*, 86(3), F35-F47. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0779.1>.
- [7] Essa, K.S., Mehane, S.A., Elhussein, M. 2021. Gravity data interpretation by a two-sided fault-like geologic structure using the global particle swarm technique. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 311, 106631. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106631>.
- [8] Pallero, J.L.G., Fernandez-Martinez, J.L., Fernandez-Muniz, Z., Bonvalot, S., Gabalda, G., Nalpas, T. 2021. GRAVPSO2D: A matlab package for 2D gravity inversion in sedimentary basins using the Particle Swarm Optimization algorithm. *Computers and Geosciences*, 146, 104653. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104653>.
- [9] Trivedi, S., Kumar, P., Parija, M.P., Biswas, A. 2020. Global optimization of model parameters from the 2-D analytic signal of gravity and magnetic anomalies over geobodies with idealized structure. In: Biswas, A., Sharma, S. (Eds.), *Advances in Modeling and Interpretation in near Surface Geophysics*. Springer Geophysics. Springer, Cham, 189-221. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28909-6_8.
- [10] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2021. Backtracking Search Optimization: A novel global optimization algorithm for the inversion of gravity anomalies. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 4507-4527. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02855-3>.
- [11] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Ai, H. 2023. 3D gravity inversion for the basement relief reconstruction through modified success-history-based adaptive differential evolution. *Geophysical Journal International*, 235(1), 377-400. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad222>.
- [12] Blum, C., Puchinger, J., Raidl, G.R., Roli, A. 2011. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. *Applied Soft Computing*, 11(6), 4135-4151. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.02.032>.
- [13] Talbi, EG. 2013. *A Unified Taxonomy of Hybrid Metaheuristics with Mathematical Programming, Constraint Programming and Machine Learning*. In: Talbi EG (ed) *Hybrid Metaheuristics*. Springer, Berlin, pp 3-76. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30671-6_1.
- [14] Ting, TO., Yang, XS., Cheng, S., Huang, K. 2015. Hybrid metaheuristic algorithms: past, present, and future. In: Yang XS (ed) *Recent Advances in Swarm Intelligence and Evolutionary Computation, Studies in Computational Intelligence*. Springer, Berlin, pp 71-83. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13826-8_4.
- [15] Li, R., Yu, N., Li, R., Zhuang, Q., Zhang, H. 2021. Transient electromagnetic inversion based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm. *Near Surface Geophysics*, 19(1), 59-71. <https://doi.org/10.1002/nsg.12129>.
- [16] Hosseinzadeh, S., Göktürkler, G., Turan-Karaoğlan, S. 2023. Inversion of self-potential data by a hybrid DE/PSO algorithm. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 58, 241-272. <https://doi.org/10.1007/s40328-023-00414-x>.
- [17] Jamasb, A., Motavalli-Anbaran, SH., Ghasemi, K. 2018. A novel hybrid algorithm of particle swarm optimization and evolution strategies for geophysical non-linear inverse problems. *Pure and Applied Geophysics*, 176(4), 1601-1613. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2059-7>.
- [18] Sohoul, AN., Molhem, H., Zare-Dehnavi, N. 2022. Hybrid PSO-GA algorithm for estimation of magnetic anomaly parameters due to simple geometric structures. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 2231-2254. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03048-2>.
- [19] Di Maio, R., Rani, P., Piegari, E., Milano, M. 2016. Self-potential data inversion through a Genetic-Price algorithm. *Computational Geosciences*, 94, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.005>.
- [20] Di Maio, R., Piegari, E., Rani, P., Carbonari, R., Vitagliano, E., Milano, L. 2019. Quantitative interpretation of multiple self-potential anomaly sources by a global optimization approach. *Journal of Applied Geophysics*, 162, 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.02.004>.
- [21] Di Maio, R., Milano, L., Piegari, E. 2020. Modeling of magnetic anomalies generated by simple geological structures through Genetic-Price inversion algorithm. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 305, 106520. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106520>.
- [22] Sengupta, S., Basak, S., Peters, RA. 2018. Particle Swarm Optimization: A survey of historical and recent developments with hybridization perspectives. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 1, 157-191. <https://doi.org/10.3390/make1010010>.
- [23] Shami, TM., El-Saleh, AA., Alswaiti, M., Al-Tashi, Q., Summakieh, MA., Mirjalili, S. 2022. Particle swarm optimization: A comprehensive survey. *IEEE Access*, Vol 10, pp 10031-10061, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142859>.
- [24] Eltaieb, T., Mahmood, A. 2018. Differential evolution: A survey and analysis. *Applied Sciences*, 8, 1945. <https://doi.org/10.3390/app8101945>.
- [25] Salman, A., Engelbrecht, AP., Omran, MG. 2007. Empirical analysis of self-adaptive differential evolution. *European Journal of Operational Research*, 183, 785-804. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.020>.

- [26] Gilli, M., Maringer, D., Schumann, E. 2019. Numerical Methods and Optimization in Finance. 2nd edn, Elsevier/Academic Press, Amsterdam.
- [27] R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- [28] Storn, R., Price, K. 1997. Differential Evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
- [29] Balkaya, Ç. 2013. An implementation of differential evolution algorithm for inversion of geoelectrical data. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 160-175. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.019>.
- [30] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2019. Parameter estimations from gravity and magnetic anomalies due to deep-seated faults: differential evolution versus particle swarm optimization. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28(6), 860-881. <https://doi.org/10.3906/yer-1905-3>.
- [31] Kennedy, J., Eberhart, R. 1995. Particle swarm optimization. In: International Conference on Neural Networks. IEEE, Piscataway, NJ, USA, November 27- December 1, pp. 1942-1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [32] Göktürkler, G., Balkaya, Ç. 2012. Inversion of self-potential anomalies caused by simple geometry bodies using global optimization algorithms. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(5), 498-507. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/5/498>.
- [33] Abdelrahman, E.M., Bayoumi, A.I., Abdelhady, Y.E., Gobashy, M.M., El-Araby, H.M. 1989. Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies. *Geophysics*, 54(12), 1614-1621. <https://doi.org/10.1190/1.1442629>.
- [34] Turan Karaoğlu, S., Göktürkler, G. 2022. Gravite Anomalilerinin Guguk Kuşu Arama Algoritması ile Ters Çözümü, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 24(72), 799-813. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247210>.
- [35] Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., Rossi, F. 2009. GNU Scientific Library Reference Manual. 3rd Edn (Bristol: Network Theory Ltd), p. 497.
- [36] Fernández-Martínez, J.L., Fernández-Muñiz, Z., Pallero, J.L.G., Pedruelo-González, L.M. 2013. From Bayes to Tarantola: new insights to understand uncertainty in inverse problems. *Journal of Applied Geophysics*, 98:62-72. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.07.005>.
- [37] Davis, W.E., Jackson, W.H., Richter, D.H. 1957. Gravity prospecting for chromite deposits in Camaguey province, Cuba. *Geophysics*, 22(4), 848-869. <https://doi.org/10.1190/1.1438427>.
- [38] Al-Garni, M. A. 2013. Inversion of residual gravity anomalies using neural network. *Arabian Journal of Geosciences*. 6(5), 1509-1516. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0452-y>.
- [39] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2020. Global Optimization of near-surface potential field anomalies through metaheuristics. In: Biswas, A., Sharma, S. (Eds.), *Advances in Modeling and Interpretation in Near Surface Geophysics*. Springer Geophysics, Springer, pp. 155-188. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28909-6_7.
- [40] Essa, K.S., Munschy, M. 2019. Gravity data interpretation using the particle swarm optimisation method with application to mineral exploration. *Journal of Earth System Science*, 128(5), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1143-4>.
- [41] Grant, F.S., West, G.F. 1965. *Interpretation Theory in Applied Geophysics*, New York: McGraw-Hill.
- [42] Clerc, M. 1999. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. In Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406), IEEE, July 6-9, Vol. 3, pp. 1951-1957. <https://doi.org/10.1109/CEC.1999.785513>.
- [43] Eberhart, R.C., Shi, Y. 2000. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. CEC00 (Cat. No. 00TH8512), IEEE, July 16-19, Vol. 1, pp. 84-88. <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.2000.870279>.
- [44] Clerc, M., Kennedy, J. 2002. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58-73. <https://doi.org/10.1109/4235.985692>.
- [45] Trelea, I.C. 2003. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection. *Information Processing Letters*, 85(6), 317-325. [https://doi.org/10.1016/S0020-0190\(02\)00447-7](https://doi.org/10.1016/S0020-0190(02)00447-7).
- [46] Carlisle, A., Dozier, G. 2001. An off-the-shelf PSO. In Proceedings of the Workshop on Particle Swarm Optimization, Indianapolis, IN, USA, pp. 1-6.
- [47] Jiang, M., Luo, Y.P., Yang, S.Y. 2007. Stochastic convergence analysis and parameter selection of the standard particle swarm optimization algorithm. *Information processing letters*, 102(1), 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2006.10.005>.



Cıvatalı Bağlantı Elemanlarının Tekrarlı Kullanımı Durumunda Sürtünme Değişikliklerini Entegre Eden Cıvatalı Bağlantı Simülasyon Modelinin Geliştirilmesi

Development of A Bolted Joint Simulation Model with Integrating Friction Changes for Repeated Use of Bolted Fasteners

Barış Tanrikulu ^{1*}, Ramazan Karkuzu ²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: tanrikulubaris@gmail.com

Öz

Cıvatalı bağlantı elemanları günümüzde birçok mekanik uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle kritik uygulamalarda, kilitleme yükü değeri, montajlanan parçaların yaşam ömrü için önem arz etmektedir. Cıvatalı bağlantı elemanları tekrar kullanılabilir elemanlar olmasına rağmen sürtünme katsayılarındaki değişim, her sıkım esnasında kilitleme yükünün giderek düşmesine sebebiyet vermektedir. Bu durum, özellikle kilitleme yükünün önem arz ettiği uygulamalarda, beklenmedik sonuçların meydana gelebileceğini ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında, bağlantı elemanlarının tekrar kullanımı durumundaki sürtünme katsayısı değişimi deneysel olarak belirlenmiş ve bu veriler ışığında yüzey kayma mesafesi bazlı sürtünme değişim modeli geliştirilmiştir. Sayısal simülasyon çalışmalarında tekrar kullanım etkisinin göz ardı edilmesinden dolayı, bu etkinin tahmin edilebilmesine olanak sağlayan modellerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Elde edilen kayma mesafesi bazlı sürtünme modeli, cıvatanın 5. sıkım sonucunda göstermiş olduğu davranışı, sayısal simülasyon yazılımı ile tahmin edebilmiştir. Model sonucunda elde edilen tork çıktıları, deneysel veri sonucunda elde edilen veriler ile kıyaslanarak hata payları çıkarılmıştır. Kayma mesafesi bazlı sürtünme modelinin, sürtünme katsayısının sabit kaldığı varsayımına dayanarak gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen çıktı torkundaki hata payını, %19,5' den %4,48'e düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cıvatalı Bağlantı Elemanı, Sürtünme Katsayısı, Sayısal Simülasyon Modeli, Mekanik

Abstract

Threaded fasteners are commonly utilized in a wide range of applications. The significance of the clamping load value has an important impact, particularly in critical applications, since it directly impacts the life span of the assembled components. Despite the fact that bolted fasteners may be reused, the clamping load gradually decreases with each tightening cycle due to changes in friction coefficients. This scenario gives rise to significant challenges, particularly in situations where the clamp load has utmost importance. In this work, the experimental determination of the friction coefficient change was conducted in relation to the reuse of fasteners. Additionally, a friction change model was established based on the surface slip distance, taking into consideration the experimental results. The absence of the reuse effect, particularly in the context of numerical simulation research, highlights the necessity of establishing a dedicated framework for the creation of numerical simulation models to address this issue. The achievement of simulating the behavior of a bolt after the 5th tightening is made possible by incorporating the derived model, which is based on sliding distance, into the numerical simulation model. The torque outputs derived from the simulation model were compared to the data collected from experiments, and the corresponding error margins were computed. The slip-based friction model was found to significantly decrease the margin of error in the output torque, reducing it from 19.5% to 4.48% in comparison to the constant friction coefficient model.

Keywords: Bolted Joint, Friction Coefficient, Finite Element Analysis, Mechanic

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Threaded fasteners are commonly utilized in a wide range of applications. The significance of the clamping load value has a significant impact, particularly in critical applications, since it

directly impacts the life span of the assembled components. Despite the fact that bolted fasteners may be reused, the clamping load gradually decreases with each tightening cycle due to changes in friction coefficients.

Numerous investigations in the existing literature have been conducted to predict and enhance the stability of the torque-clamp load relationship [1–3]. The reusability of bolted fasteners has long been acknowledged, however, recent investigations have brought to light the detrimental consequences associated with their reuse. The phenomenon of coefficient of friction change within the contact surfaces of bolted fasteners arises due to repetitive utilization, thereby exerting an influence on the overall operational efficacy and dependability of the connection. The comprehension and anticipation of changes in friction hold significant value, particularly in contexts that demand highest levels of accuracy and reliability. Previous research has revealed significant variations in friction coefficients, which are dependent on the type of coating utilized and various environmental factors. In addition to the previously mentioned investigations, various professional searches have been conducted to develop theoretical models clarifying the friction coefficient [5,6]. In addition to these, numerous studies on the theoretical modeling of the friction coefficient have been conducted. These investigations unveiled the fact that the bearing friction coefficient and thread friction coefficient has different impacts [13,14].

The present study highlights the existing limitations in the field of fastener simulation, specifically pertaining to the treatment of friction effects within the thread area. While numerous software and models have been developed to address this subject, the general focus within the industry remains on maintaining a constant clamp load at a macro level. Consequently, the complex aspects of friction effects have not been fully incorporated into these models. The aforementioned circumstance gives rise to a deficiency, particularly in instances where the friction coefficient within the threaded section and bearing regions takes significance. To date, extensive research has been conducted in the field; however, a notable gap remains in the literature regarding comprehensive investigations into the detailed modeling of fastener behavior during repetitive utilization. This study aims to investigate the impact of re-tightening on the friction coefficient within the context of a numerical simulation model. Specifically, the change in the friction coefficient will be utilized as an input parameter in the model. Consequently, the torque-clamp load relationship resulting from multiple tightening can be accurately represented through numerical modeling.

Materials and Methods

To investigate the changes of the friction coefficient resulting from the repeated utilization of the fastener, an experimental analysis was conducted. The International Organization for Standardization (ISO) standard 16047 [4] is commonly used in manufacturing industries for determining the friction coefficient as part of experimental investigations.

In the context of the experimental procedures conducted, a tightening speed of 50 revolutions per minute (RPM) was used, and the resultant clamp load and torque values were measured using load sensors and documented accordingly. In the course of the experimental trials, the load value for target clamp load was determined to be 18.24 kN. This value was obtained by considering 60% of the "proof load" value of an M8 coarse thread 10.9 bolt, as specified in the ISO 898/1 [19] standard. Following the initial experimentation, a series of tests were conducted wherein the rotation angles were systematically reduced to 60°, starting from the settlement value of 1 Nm.

For the computational numerical simulation, ANSYS R23 transient analysis module was used. The tightened part's rigidity

affects torque clamp load behavior. Thus, axial elongation depends on tightened component stiffness. Experimental and numerical simulations have highlighted the importance of proper contact modeling and spring constant on bolt elongation [17,20].

The torque-angle-clamp load graph from the experimental tests was compared to simulation output to determine the stiffness value of the joint. Experimental data verified this comparison, proving the value's accuracy and confidence. The reference model was developed by theoretically calculating assembly stiffness and calibrating the simulation model with experimental data.

Primary objective of this study was to develop a friction model capable of accurately predicting the relationship between clamp load and torque during repeated tightening. To achieve this goal, a friction model based on sliding distance was constructed using experimental data. In the context of the present model, it is observed that the sliding distance values of the thread and bearing regions exhibit distinct variations. Consequently, distinct friction parameters have been formulated for each of these regions and implemented into the simulation model.

Results and Discussion

According to the obtained results of repeated tightening, it can be observed that the trend of variation in the coefficient of friction exhibits similarities with the friction value between the thread and the bearing surface. However, it is evident that the friction coefficient in the thread region is lower than that in the head region. In order to integrate the desired friction coefficient model into the simulation properly, two separate inputs have been defined for the thread and bearing surface using APDL code, based on the sliding distance (SLDI) value. The APDL code allows a linear calculation of the friction coefficient value of the relevant region based on the sliding distance model. According to the given code in Figure 12, the underhead friction coefficient for the second tightening is entered as 0.134 for SLDI 0mm, 0.152 for SLDI 5.65mm, and 0.162 for SLDI 9mm, for preventing any form of extrapolation. An increase in torque values has been observed in relation to the number of tightening cycles. The obtained data is presented graphically in Figure 13. The findings of the study indicate a difference of 7.5 Nm between the first and fifth tightening.

Conclusion

The present study clarifies the impact of variations in the friction coefficient under repeated usage based on experimental outcomes. The observed trends in friction coefficients, particularly, in the case of bolts with zinc coating, align with the results reported in a previous study [11]. The utilization of empirical data and the development of a friction model founded on experimental outputs have facilitated the development of a highly precise model that exhibits minimal deviation from actual outcomes. A variety of studies have been conducted to investigate the changes of friction coefficient in response to repeated usage. The accurate representation of the cumulative impact of friction modification poses a significant challenge for simulation models employing existing friction models. Proposed friction model demonstrates a high degree of accuracy in predicting numerical simulation outcomes following the repetition of five bolt usage instances. Accurate measurement of the lclamp load change is crucial in applications that require precise calculation of clamp load. This study aimed to determine the conclusions with a margin of error of 4.48% by utilizing the friction coefficient change model and analyzing experimental data.

1. Giriş

Cıvatalı bağlantı elemanlarının kullanımı, sağlam ve güvenilir bağlantıların kurulmasını kolaylaştırdığından, çeşitli mekanik sistemlerde önemli bir işlev üstlenmektedir. Günümüzde birçok alanda kendine yer bulan cıvatalı bağlantı elemanlarının işlevselliğini yerine getirebilmesi için, uygun montaj parametreleri altında montajı gerçekleştirilmelidir. Aksi takdirde, çevresel faktörler sebebi ile bağlantıdan istenilen performans alınamamaktadır. Bağlantı elemanlarının montaj ve performansını etkileyen birçok parametre olmasına karşın en bilinen ve en etkin 3 parametre vardır. Sürtünme katsayısı, uygulanan tork değeri ve bunların sonucunda ortaya çıkan bağlantıdaki kilitleme yüküdür. Bunlardan, temas yüzeylerindeki sürtünme katsayısına yönelik olarak yapılan çalışmalarda, kafa altı ve diş yüzeyindeki sürtünme değişimlerinin, kilitleme yüküne olan etkileri incelenmiş ve efektif temas alanlarının önemine vurgu yapılmıştır. Bulgular, sürtünme katsayısının artması ile torkun aynı kalması durumunda, kilitleme yükünde düşüş olacağını göstermiştir [1-3]. Bağlantı elemanlarının kullanılacağı tasarımlarda referans alınan hedef kilitleme yükü değeri, cıvatanın akma değerinin %60-70' ine tekabül etmektedir. Tork değerleri belirlenirken, genellikle ISO 16047[4] şartnamesinde verilen total sürtünme katsayısı modeli kullanılarak hedef tork aralığı belirlenmektedir. Bu sebeple, cıvatalı bağlantı elemanlarında tork-kilitleme yükü ilişkisi önem arz etmektedir. Literatürde bugüne kadar yapılan birçok çalışma, tork-kilitleme yükü arasındaki ilişkinin öngörülmesi ve dengelenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir [5,6]. Özellikle, kilitleme yükü tork ilişkisinin sayısal olarak modellenmesine yönelik olarak çalışmalar gerçekleştirilmiş ve geometrik parametrelerin etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sürtünme katsayısının kilitleme yükü üzerindeki etkisinin, hatve ve delik çapı gibi parametrelerden daha etkin olduğunu ortaya koymaktadır [7].

Cıvatalı bağlantı elemanları, tekrar kullanılabilen bağlantı elemanı statüsünde olmasına rağmen, bu elemanların tekrar kullanımları durumunda, performanslarında istenmeyen etkilerin olabileceği ortaya çıkarılmıştır. Bu etkiye örnek olarak, hayati kritikliğe sahip helikopter ana rotorunda kullanılan cıvataların tekrar kullanılmaması için şartnamelerinde herhangi bir ibare bulunmamasından dolayı, cıvataların servis personeli tarafından tekrar kullanıldığı ve bunun sonucunda sürtünme katsayılarında değişim olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişim ise, bağlantının hedef kilitleme yükü değer aralığında kalmamasına sebebiyet vererek cıvataların kopmasına neden olmuştur [8]. Benzer bir çalışmada, motosiklet ön aks bağlantısını sağlayan cıvataların tekrar kullanılması durumunda sürtünme katsayısı değişimleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, titanyum cıvataların tekrar kullanılması ile sürtünme katsayılarında %39'a varan bir artış olduğunu göstermiştir. Sürtünme katsayısındaki artış sebebi ile, hedeflenen kilitleme yükü değerine ulaşamadığı tespit edilmiştir. Bunun önüne geçmek için, cıvataların tekrar kullanılması durumunda farklı yağlayıcı tiplerinin kullanılması önerilmiştir [9]. Cıvatalı bağlantı elemanı temas yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısındaki değişiklik, tekrarlı kullanımın bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Dolayısıyla, bağlantının genel işlevselliğini ve güvenilirliğini etkileyebilecek bir duruma sokmaktadır, bunun etkilerini azaltmak amacı ile farklı özellikteki yağlayıcıların davranışları incelenmiştir [10]. Bu sebeple, sürtünme değişikliklerinin anlaşılması ve öngörülmesi, kritik etkiye sahip aplikasyonlar için önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalarda, cıvatalı bağlantı elemanlarının tekrar

kullanımı durumunda, kaplama tipine ve çevresel faktörlere bağlı olarak da sürtünme katsayılarında değişiklikler olduğu tespit edilmiştir. Buna örnek olarak, çinko kaplamalı cıvatalarla yapılan bir çalışmada, cıvatanın tekrar kullanılması durumunda, sürtünme katsayısının 0,3 değerine kadar çıktığı tespit edilmiştir [11]. Benzer alanda yapılmış başka bir çalışmada ise, lamelli kaplama tipine sahip cıvataların, raf ömrü, nemlilik ve sıcaklık gibi çevresel koşullardan dolayı, sürtünme katsayılarında %47 oranında bir değişiklik yaşadığı saptanmıştır [12]. Bunların dışında, sürtünme katsayısının teorik olarak modellenmesine yönelik de farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, kafa altı sürtünme katsayısının ve diş bölgesinin ayrı ayrı etken olduğu ortaya konmuştur [13].

Bağlantı elemanlarının montaj koşulları altında davranışlarının incelenmesine yönelik olarak sayısal simülasyon araçları öneme sahiptir. Bu kapsamda, çalışmalar yapılmış ve bağlantı elemanlarının davranışları incelenmiştir [14,15]. 3 boyutlu simülasyon modellerinde özellikle parametrik etkilerin önemine vurgu yapılmış ve sonuç olarak eksenel rijitliğin önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur [16].

Bağlantı elemanı simülasyonu konusunda birçok yazılım ve model olmasına rağmen, sektördeki mevcut modeller makro ölçekte kilitleme yükünün sabit alınmasına odaklanmakta ve özellikle diş bölgesindeki sürtünme etkilerini detaylı olarak incelememektedir. Bu durum, diş ve kafa altı bölgesindeki sürtünme katsayısının önem arz ettiği durumlarda eksiklik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu zamana kadar detaylı çalışmalar yapılmış olsa da bağlantı elemanlarının tekrarlı kullanımı altında davranışlarının detaylı olarak modellenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Çalışma kapsamında, tekrar sıkım sonucunda sürtünme katsayısındaki değişimin, sayısal simülasyon modelinde girdi parametresi olarak tanımlanması sağlanacaktır. Bunun sonucunda, birden fazla sıkım durumunda oluşan tork-kilitleme yükü ilişkisinin sayısal olarak modellenmesi sağlanacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Yöntem

Bağlantı elemanlarının tekrarlı kullanımı durumunda, sürtünme katsayısı değişiminin modellenmesine yönelik olarak öncelikle sürtünme katsayısının değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, sürtünme katsayısının tespit edilmesi için sektörde kullanılmakta olan ISO 16047[4] standardı referans alınmıştır. Özellikle standartta mevcut olan sürtünme katsayılarının tespitinde Denklem 1'de verilen formülasyon kullanılmıştır. Burada, μ_{th} , diş bölgesindeki sürtünme katsayısı, μ_b , kafa altı bölgesindeki sürtünme katsayısı, T tork, F kilitleme yükü, P hatve, d_2 bölüm dairesi çapı, D_o ve d_h ise kafa altı bölgesindeki iç ve diş temas çapı değerleridir.

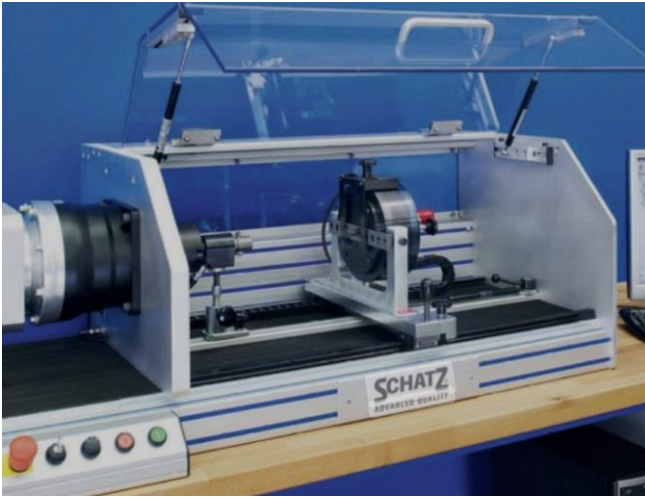
$$T = F \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{P + 1.154 \times \pi \times \mu_{th} \times d_2}{\pi - 1.154 \times \mu_{th} \times \frac{P}{d_2}} + \mu_b \times \frac{D_o + d_h}{4} \right] \quad (1)$$

Deneysel çalışma kapsamında ise Tablo 1'de standart özellikleri verilen bağlantı elemanı, ISO 16047'ye[4] göre test plakaları kullanılarak diş, kafa altı ve toplam sürtünme katsayılarındaki değişimler incelenmiştir. Kaplama tipi ise Çinko Cr⁺³+TNT12 [17] seçilmiştir.

Tablo 1. Test materyalleri.**Table 1.** Test materials.

Özellikleri	Cıvata	Somun	Test Plakası
Standard	ISO 4017	ISO 4032	ISO 16047
Dayanım	10.9	10	50-60 HRC
Metrik	M8	M8	---
Kaplama tipi	Çinko Cr ⁺³ +TNT12	Çinko Cr ⁺³ +TNT12	---
Sürtünme katsayısı (μ_{total})	0,09-0,14	0,09-0,14	---

Her bir cıvata, arka arkaya, değiştirilmeden, sökölüp sıkılmış ve bu işlem 5 kere tekrar edilmiştir. Bahsi geçen metodoloji ile 5 cıvata test edilmiş, bunun sonucunda 5 farklı kombinasyon için 25 test verisi elde edilmiştir. Bunlar, her sıkım sayısı için 5 veri anlamına gelmektedir. Tekrar sıkım altında cıvataların sürtünme katsayılarındaki değişimleri, ISO 16047 [4] şartnamesindeki sürtünme katsayısı tespit yöntemine göre Şekil 1’de verilen test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler kapsamında 50 devir/dakika (RPM) sıkım hızı kullanılmış, yük sensörlerinden okunan kilitleme yükü ve tork değerleri kaydedilmiştir. Testler esnasında hedef kilitleme yükü değeri cıvatanın ISO 898/1 [18] standardındaki M8 kaba diş 10.9 “proof load” değerinin %60’ ı referans alınarak 18.24 kN değerinde gerçekleştirilmiştir. 10.9 cıvataların dayanımı, standart kapsamında kontrol altına alınmıştır. Buna göre, 10.9 ibaresi 900MPa akma ve 1000 MPa çekme dayanımına tekabül etmektedir. Akabinde, elde edilen dönme açıları, 1 Nm oturma değerinden itibaren 60° olacak şekilde hedeflenmiş ve testler gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 1.** Test cihazı görseli.**Figure 1.** Test device visual.

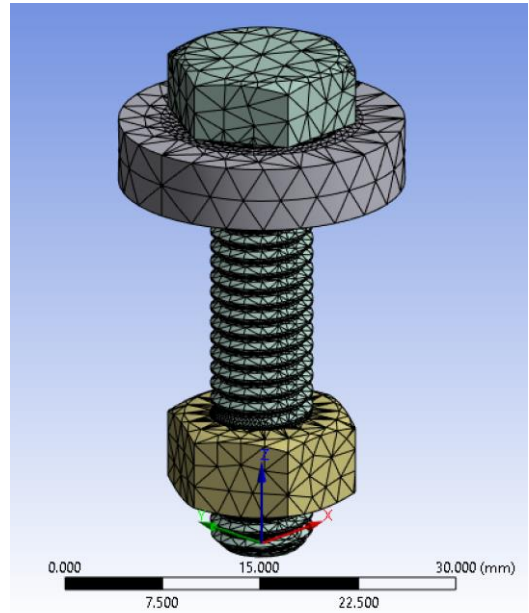
2.2. Sayısal Simülasyon Modeli

Sayısal simülasyon çalışması kapsamında ANSYS Transient analiz modülü kullanılmıştır. Model kapsamında cıvata, somun diş profilleri ve kafa altı temas plakası CATIA aracılığı ile 3D olarak modellenmiş ve STEP dosyası olarak ANSYS modülüne aktarılmıştır. Simülasyon kapsamı elastik bölgeye yoğunlaştığı için cıvatanın izotropik elastisite özellikleri girdi olarak tanımlanmıştır. Hacim modülü ve kayma modülü girdilerine göre sistem tarafından otomatik tanımlanmıştır. Bu özelliklere ait detaylar Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Malzeme ve mekanik özellikler.**Table 2.** Mechanical properties of the material.

Özellik	Değerler
Elastisite modülü	200 GPa
Poisson oranı	0,3
Çekme dayanımı	1000 MPa
Akma dayanımı	900 MPa

Sonlu eleman ağı oluşturulması esnasında, özellikle temas bölgelerinde ek iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman ağı yapılırken dörtgen piramit örgü yapısı seçilmiştir. Ana modelde 3mm eleman boyutu ataması yapılırken, temas yüzeylerinde bu değer 2mm’ ye düşürülerek ekstra yüzey iyileştirme gerçekleştirilmiştir. Cıvata kafa altı ve plaka temas yüzeyi çevresi 60 eşit bölmeyle dilimlenmiş ve daha sonrasında yüzey ağı gerçekleştirilmiştir. Toplam ağ elemanı sayısı 57482, düğüm sayısı ise 95582 olarak tespit edilmiştir. Ağ kalitesini ölçen parametrelerden biri olan “skewness” (eğiklik) değeri model için ortalama 0,46 olarak tespit edilmiştir. Eleman kalitesi ise 0,75 olarak ölçülmüştür. Sonlu eleman ağı oluşturulması sonucunda oluşan modele ait görsel Şekil 2’de verilmiştir.

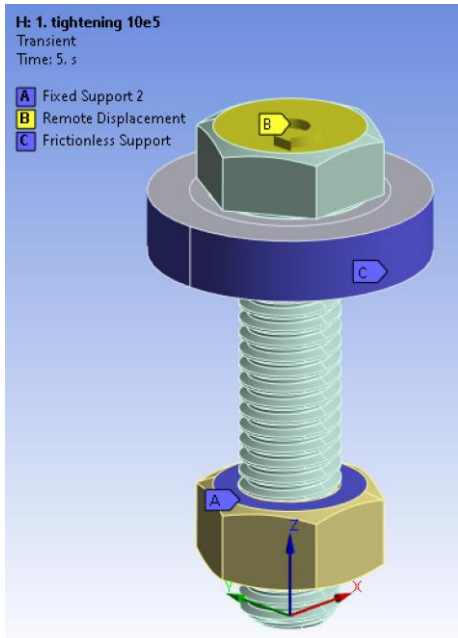
**Şekil 2.** Örgü ana model.**Figure 2.** Main mesh model.

Simülasyon modelinin doğru kilitleme yükü sonucunu verebilmesi için, en önemli parametrelerden biri de sürtünme katsayısı değeridir. Sürtünme katsayısı, bağlantı elemanlarında diş ve kafa altı olarak ikiye ayrılmakta ve bu değerlerin doğru girilmesi simülasyon çıktısı için önem arz etmektedir. Bu sebeple, diş ve kafa altı temas bölgeleri “frictional” (sürtünmeli) olarak tanımlanmış ve sürtünme katsayıları, ilk sıkım sonucunda elde edilen deneysel veriler referans alınarak girilmiştir. Çözücü formülasyonunda ise “Augmented Lagrange” modeli seçilmiştir.

Transient analiz ayarlarında ise ana model, 2 zaman aralığından oluşacak şekilde girilmiştir. Alt adım sayıları ise, zaman bazlı girilerek simülasyonun doğruluk payının artırılması hedeflenmiştir. Birinci adım 5 saniye ve 40 alt adımdan oluşturulurken, ikinci 5 saniyelik dilimde benzer şekilde 40

adımdan oluşturulmuştur. Model, toplam 80 alt adım içermektedir.

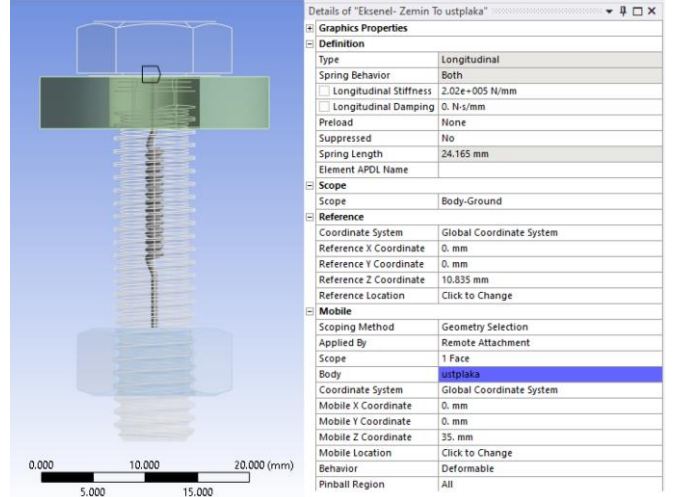
Simülasyon modelinde civatanın z ekseninde dönmesi, açısal rotasyon olarak tablo verisi şeklinde girilmiştir. 10. saniye sonunda, açısal dönmenin 60° olması hedeflenmiştir ve bu girdi civatanın kafasından açısal yer değiştirme olarak verilmiştir. Bu sayede, kilitleme yükü çıktısı, çıktı torkundan bağımsız olarak sabit kalabilecektir. Üst plakının tanımlanmasında ise, tek serbestlik dereceli sürtünmesiz destek modeli kullanılmıştır. Bunun için, yanal yüzeyler seçilmiş ve plakanın sadece z ekseninde doğrultusunda serbestlik derecesi olması sağlanmıştır. Somun bölgesinde ise, somun üst yüzeyi sabit destek olarak modellenerek somunun herhangi bir doğrultuda rotasyonu engellenmiştir. İlerleyen aşamalarda moment değerinin çıktı değeri için ölçülmesinde ise civata kafası referans alınmış ve toplam tork değerinin çıktısı elde edilmiştir. Kilitleme yükünün ölçülmesinde ise referans nokta, somun alt yüzeyindeki sabit destek noktası olarak alınmış ve Newton cinsinden oluşan kilitleme yükü verileri elde edilmiştir. Modelin sınır şartlarını gösteren görsel ise Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Model sınır şartları.

Figure 3. Boundary conditions of the model.

Tork kilitleme yükü davranışını etkileyebilecek bir diğer önemli parametre ise sıkım yapılan parçanın rijitlik değeridir. Civata ekseninde doğrultusunda uzama, kilitleme yükü çıktısını oluşturduğundan dolayı, sıkılan parçaların rijitliği aksel uzamayı doğrudan etkilemektedir. Yapılan deneysel ve sayısal simülasyonlarda, temas modellemesinin ve yay sabiti etkisinin doğru girilmesi civata uzamasını doğrudan etkilediği için önem arz ettiği vurgulanmıştır [16,19]. Oluşturulan sayısal simülasyon modelinin, rijitlik değerinin test sistemi ile eşleştirilmesi gerekmektedir. Bu değer tespit edilmesine yönelik olarak, ilk sıkım testleri esnasında elde edilen tork-açı-kilitleme yükü değerleri kullanılmıştır. Deneysel verilerin, simülasyon çıktısıyla eşleşmesi sayesinde modelin rijitlik katsayısı doğrulanmıştır. Referans model oluşturulurken, montaj rijitliği teorik olarak hesaplanmış ve simülasyon modelinin kalibre edilmesine deneysel sonuçlar kullanılarak ilenmiştir. Bu değer, simülasyonda kilitleme boyu bölgesi boyunca aksel yay olarak tanımlanmıştır. Yay girdisine ait değerler ve model görseli Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Model yay sabiti tanımlaması.

Figure 4. Spring constant definition of the model.

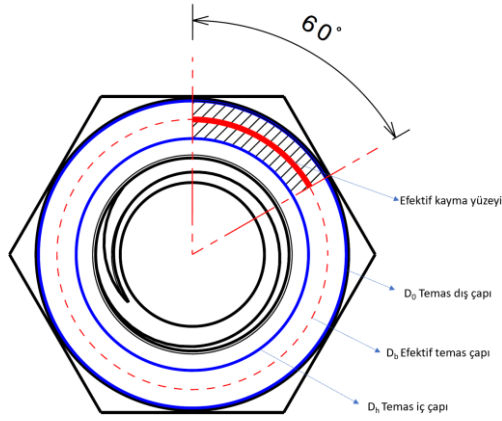
2.3. Sonuçlar

Çalışma kapsamındaki ana hedefimiz, tekrarlı sıkım altında kilitleme yükü tork ilişkisini verebilecek bir sürtünme modelinin oluşturulmasıdır. Bu sebeple, deneysel veriler kullanılarak kayma mesafesi bazlı sürtünme modeli oluşturulmuştur. Model kapsamında, diş ve kafa altı bölgelerinin kayma mesafesi değerleri birbirinden farklılık göstermektedir. Bu sebeple, her iki bölge için de ayrı ayrı sürtünme parametreleri oluşturulmuştur. Kafa altı sürtünme modeli geliştirilirken, 60° 'lik sıkım esnasındaki kayma mesafesi, efektif kafa altı temas çapı alınarak oluşturulmuştur. Civata eksenine yaklaştıkça veya uzaklaştıkça çizgisel kayma mesafesi değişeceğinden dolayı bu yöntem tercih edilmiştir. Literatürde, efektif kafa altı temas çapının önemine ve etkisine yönelik farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bir çalışmada, kontak mekanik yöntemi olarak kafa altı basınç dağılımının farklı yüzey koşullarındaki ve delik çapı oranlarındaki etkisi incelenerek, kontak mekaniği bazlı modelin kullanılması önerilmektedir [20]. Bunun dışında, rotasyonel hızdan bağımsız elde edilen r_b efektif kontak değeri ise, iç ve dış temas yarıçaplarının tork çıktısına etkisi ile oluşturulmuştur. Bahsi geçen çalışmanın sonucunda elde edilen çıktı Denklem 2'de verilmiştir [3]. İlgili denklemde, r_{b-max} maksimum temas dış yarıçapını, r_{b-min} minimum temas yarıçapını, $P_b(r)$ r yarıçapındaki yüzey basıncını, r ise aksel mesafeyi vermektedir. Benzer bir çalışma, yüzey basınç dağılımı bazlı olarak gerçekleştirilmiştir ve farklı durum şartları için denklemler elde edilmiştir [17].

$$r_b = \frac{\int_{r_{b-min}}^{r_{b-max}} P_b(r)r^2 dr}{\int_{r_{b-min}}^{r_{b-max}} P_b(r)r dr} \quad (2)$$

Sektörde ise, kolaylığı ve güvenilirliği sebebi ile geometrik efektif çapı veren ve ISO 16047' de önerilen Denklem 3 kullanılmaktadır. Burada, D_o temas alanının dış çapı, D_h temas alanının iç çapı, D_b ise efektif temas çapıdır. Diş kayma efektif çapı ise, doğrudan bölüm dairesi çapı (d_2) referans alınarak hesaplanmıştır. Civata kafasının, kayma yüzeyini ve çapını gösteren çizimi Şekil 5' de, diş bölgesi temas yüzeyi ise Şekil 6' da verilmiştir.

$$D_b = \frac{D_o + d_h}{2} \quad (3)$$

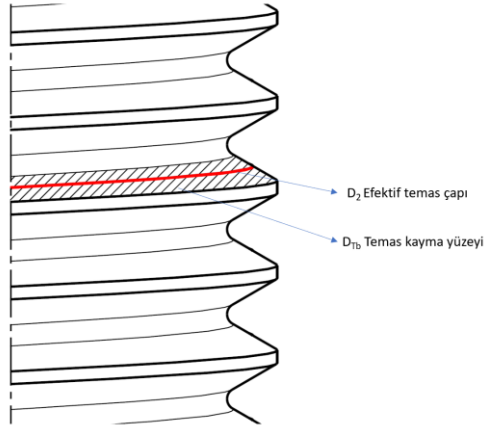


Şekil 5. Cıvata kafa altının kayma yüzeyi ve çapı.

Figure 5. Sliding surface and diameter of the bolt bearing area.

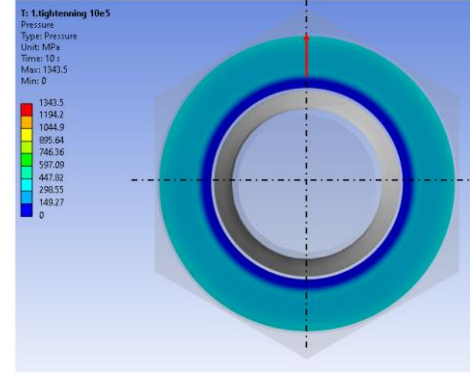
Diş temas bölgesinin efektif çapının etkisine yönelik olarak yapılan çalışmalar, çap değişiminin helis açısı ve temas yüzeyinden dolayı sınırlı kalacağını ve bu sebeple, sürtünme katsayısına etkisinin, kafa altı efektif çapı etkisine kıyasla daha düşük olacağı saptanmıştır. Çalışma esnasında elde edilen bulgulara göre, efektif dış yarıçapı ile bölüm daire çapı arasındaki farkın sürtünme katsayısına etkisinin %1'den düşük olduğu görülmüştür [2]. Bahsi geçen bulgular ışığında, diş yüzeyinin efektif çapı, D_2 bölüm daire çapı alınarak kayma mesafeleri tespit edilmiştir.

Efektif kafa altı basınç dağılımını ve iki farklı yöntemi referans alarak, efektif yarıçapın bulunmasına yönelik olarak yapılan çalışma sonucuna göre, tavsiye edilen geometrik merkezin hem basınç dağılımı hem de çıktı sonuçlarına göre uygun olacağı tespit edilmiştir. Buna yönelik olarak, Şekil 7 (a)' da yüzey basınç dağılımı verilmiş ve Şekil 7 (b)' de ise x eksenini doğrultusundaki yüzey basınç değişimi grafiklendirilmiştir.

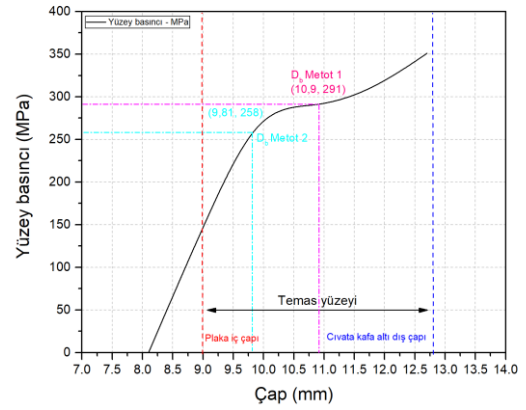


Şekil 6. Cıvata diş bölgesi kayma yüzeyi ve çapı.

Figure 6. Bolt thread area sliding surface and diameter.



(a)



(b)

Şekil 7. Kafa altı temas yüzey basınçlarının y ekseninde doğrultusunda değişimi (a) ve 2 farklı yöntemle efektif çapların gösterimi (b).

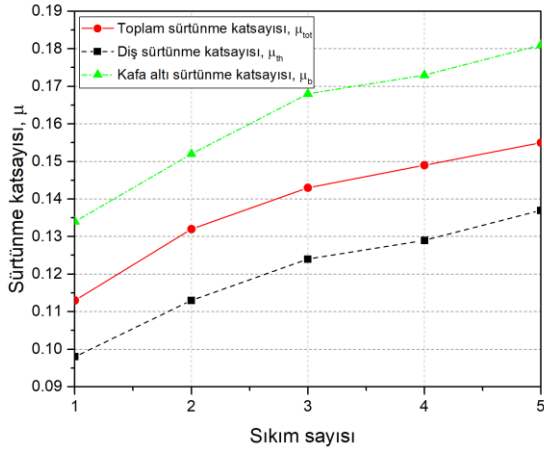
Figure 7. Variation of under-head contact surface pressures along the y-axis (a) and representation of effective diameters according to 2 different methods (b).

Modelin sürtünme katsayısı ile eşleştirilebilmesi için öncelikle tekrarlı sıkım altında sürtünme katsayısı değişimi sonuçları deneysel olarak elde edilmiştir. Buna göre, μ_{th} diş sürtünme katsayısını, μ_b kafa altı sürtünme katsayısını ve μ_{tot} ise total sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Tablo 3 ve Şekil 8' deki sonuçlardan da görüleceği üzere, birinci sıkım sonrasında sürtünme katsayılarında kademeli bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Deneysel sürtünme katsayısı sonuçlarının 5 test ortalaması ve standart sapma değerleri.

Table 3. Five test average and standard deviation values of experimental friction coefficient results.

Sıkım tekrar sayısı	μ_{th}	Standart sapma	μ_b	Standart sapma	μ_{total}	Standart sapma
1.	0,098	0,011	0,134	0,009	0,113	0,011
2.	0,113	0,014	0,152	0,010	0,132	0,011
3.	0,124	0,019	0,168	0,013	0,143	0,015
4.	0,129	0,022	0,173	0,019	0,149	0,020
5.	0,137	0,026	0,181	0,023	0,155	0,024

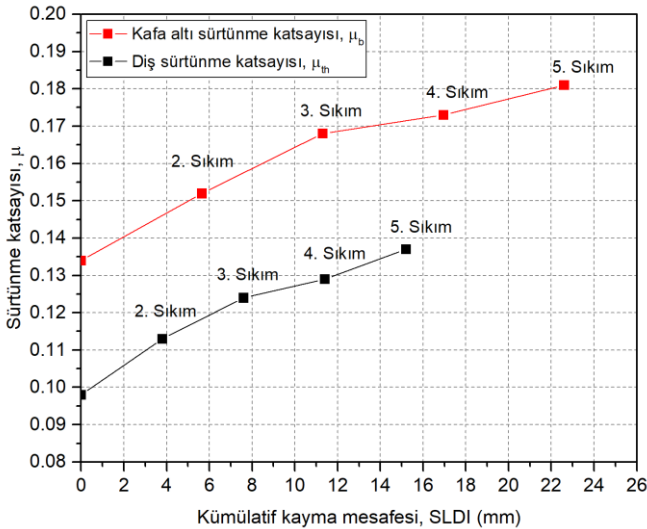


Şekil 8. Tekrarlı sıkım altında sürtünme katsayısı değişim grafiği.

Figure 8. Friction coefficient change graph under repeated tightening.

Elde edilen tekrarlı sıkım sonuçlarına göre, sürtünme katsayısındaki değişim trendi diş ve kafa altı sürtünme değeri ile benzerlik göstermesine rağmen, diş bölgesi sürtünme katsayısı değerinin kafa altından daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, kafa altı ve diş bölgelerinin sürtünme değerlerinin modelleme esnasında büyük fark yaratacağını ortaya koymaktadır.

Elde edilen sıkım sayısına bağlı sürtünme katsayısının, simülasyon modeline girilebilecek bir parametreye dönüştürülmesi aşamasında, kayma mesafeleri ile dönme açıları arasında doğrudan bağ olmasından dolayı "SLDI (sliding distance-kayma mesafesi)" bazlı modelin sürtünme katsayısı değişimini veren kümülatif kayma mesafesi verisi elde edilmiştir. Burada, her bir sıkım esnasında kafa altı ve diş bölgesindeki kayma mesafelerinin hesaplanmasında, Bölüm 2.3' de verilen yöntem kullanılmıştır. Bunun sonucunda, kümülatif olarak kafa altı ve diş yüzeyinin 5. sıkıma kadar olan kümülatif kayma mesafesi değerleri Şekil 9' da verilmiştir.

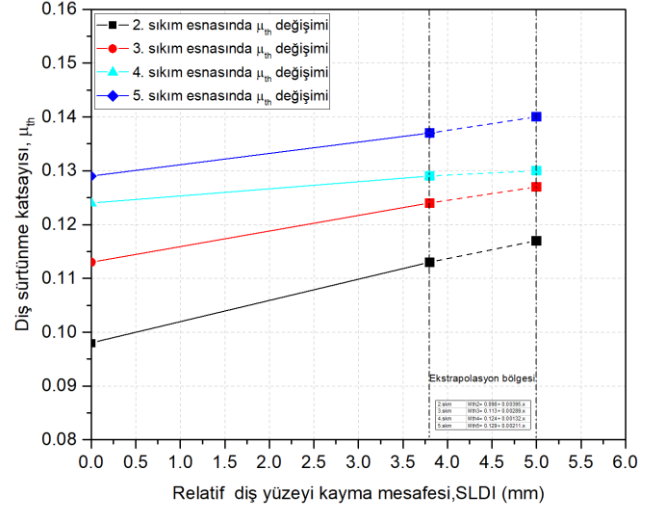


Şekil 9. Kümülatif kayma mesafesi ile sürtünme katsayısı değişimi.

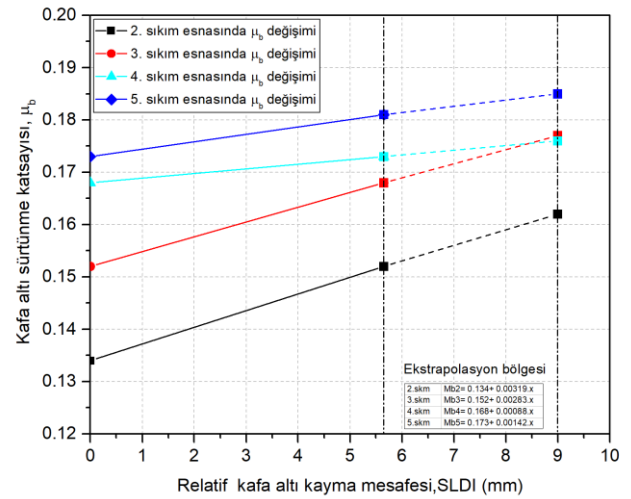
Figure 9. Friction coefficient change with cumulative sliding distance.

Elde edilen verilerden de görüleceği üzere, kafa altı ve diş yüzeyinin kayma mesafeleri birbirlerinden farklıdır. Bu durum, her bir bölge için özel bir kayma mesafesi – sürtünme katsayısı modelinin ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Her bir simülasyon modelinin, ilgili tekrarlı sıkım sayısındaki davranışını elde edebilmek adına, kayma mesafeleri her bir sıkım değeri için sabit alınmış ve kafa altı ile diş bölgelerinin sürtünme katsayılarının relatif kayma mesafesine göre değişimleri elde edilmiştir. Model, sıkım esnasındaki sürtünme katsayısı değişimini lineer olarak hesaplamakta ve sürtünme katsayısını kayma mesafesi bazlı olarak entegre etmektedir. Buna göre, deneysel verilerden elde edilen kayma mesafesi bazlı grafikler Şekil 10' da verilmiştir.



(a)



(b)

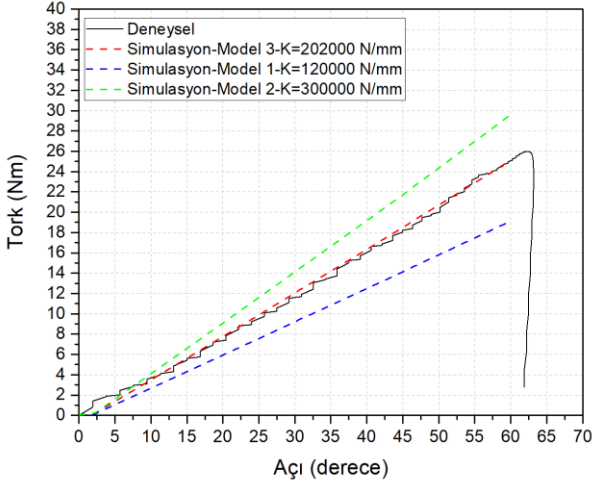
Şekil 10. Sıkım esnasında relatif kayma mesafesi bazlı sürtünme katsayısı değişimi, diş (a), kafa altı (b).

Figure 10. Friction coefficient change based on relative sliding distance during tightening, tooth (a), under head (b).

3. Bulgular ve Tartışma

Sayısal simülasyon modelinin ilk etapta yay rijitliğinin doğrulanması gerçekleştirilmiş ve ilk sıkım esnasındaki tork açığı grafiğinden elde edilen veriler ile eşleştirilmesi sağlanarak deneysel test sisteminin rijitlik değerinin simülasyon modeline uygulanması sağlanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle 120000

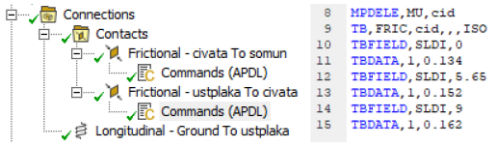
N/mm değeri kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir ve model 1 olarak adlandırılmıştır. Model 1 sonucunda elde edilen tork açı grafiğinin deneysel veriler ile uyuşmasını sağlamak amacıyla, yay sabiti 300000 N/mm değerine çıkarılmış ve model 2 oluşturulmuştur. Daha sonrasında, iki modelin deneysel model ile açı farkının interpolasyonu ile yeni bir değer tespit edilmiştir. Elde edilen 202000 N/mm değeri kullanılarak model 3 oluşturulmuştur. Ana rijitlik modelinin doğruluğu, dönme açısı, çıktı torku ve oluşan kilitleme yükü değerlerinin deneysel verilerle eşleştirilmesi ile doğrulanmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçları içeren veriler Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Farklı yay sabitlerindeki tork açı değerleri.

Figure 11. Torque angle values at different spring constants.

Ana modelin kurgulanması sonrasında, amacımız olan sürtünme katsayısı modelinin simülasyona entegre edilebilmesi için kayma mesafesi (sliding distance, SLDI) değerini baz alan simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda, APDL kodu aracılığı ile diş ve kafa altı temas bölgeleri için iki ayrı sürtünme girdisi tanımlanmıştır. APDL kodu, ilgili bölgenin sürtünme katsayısı değerini, lineer formda, kayma mesafesi bazlı girilmesine olanak vermektedir. Buna göre, Şekil 12’de verilen kod ile, kafa altı sürtünme katsayısı 2. sıkım için SLDI 0mm iken 0,134, SLDI 5,65mm iken 0,152 ve SLDI 9 mm iken ise 0,162 girilerek uç enterpolasyon yapılması engellenmiştir.



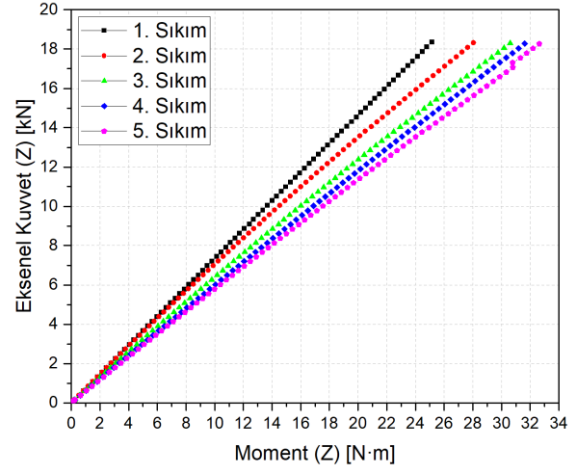
Şekil 12. 2. sıkım için kayma mesafesi bazlı sürtünme modeli APDL kodu.

Figure 12. APDL code for sliding distance based friction model for 2nd tightening.

Aynı girdi, her bir simülasyon modeli için ayrı ayrı oluşturularak sürtünme katsayısı değerlerinin modele entegre edilmesi sağlanmış ve simülasyonlar çalıştırılmıştır. Simülasyon sonucunda beklenildiği gibi, aynı eksenel kuvvet değerlerinde sıkım sayısına bağlı olarak tork değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, Şekil 13’de grafik olarak verilmiştir. Bulgular sonucunda, 1. sıkım ile 5. sıkım arasında 7.5 Nm fark olduğu tespit edilmiştir.

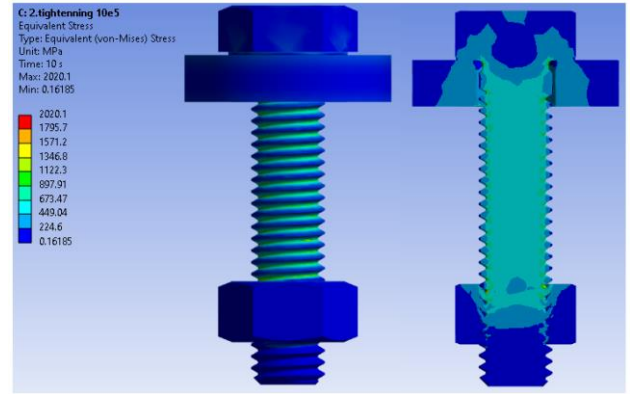
Simülasyon modelinin diğer çıktıları incelendiğinde, beklenildiği gibi bir von Mises eşdeğer gerilme dağılımı olduğu tespit

edilmiştir. Buna göre, en yüksek gerilmeler somun dış bölgesi ile temas eden ilk 3 dişte oluşmaktadır. 2. sıkıma ait gerilme dağılımı Şekil 14’de verilmiştir.



Şekil 13. Tekrarlı sıkım sayısı bazlı eksenel kuvvet-tork değişimi simülasyon çıktısı.

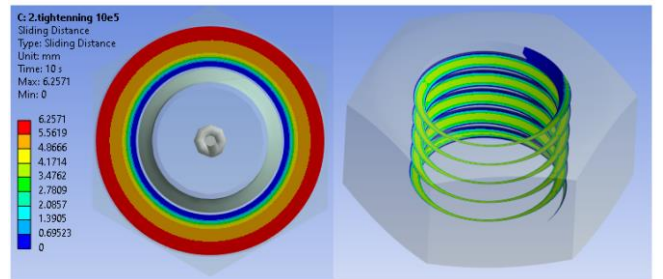
Figure 13. Simulation output of axial force-torque change based on the number of repeated tightening.



Şekil 14. Von Mises eşdeğer gerilme dağılımı.

Figure 14. Von Mises equivalent stress distribution.

Elde edilen çıktılar detaylı incelendiğinde, beklenildiği gibi, yüzey temas bölgelerindeki kayma mesafelerinin farklı olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, SLDI bazlı sürtünme modelinin önemini ortaya koymaktadır. Benzer durum, gerçek test numunelerinin temas yüzeyleri incelendiğinde de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 15. Civata kafa altı ve somun diş yüzeyi kayma mesafesi, 2. Sıkım.

Figure 15. Sliding distance under bolt head and nut thread surface, 2nd tightening.

Şekil 15' de görüldüğü üzere, kafa altı dış çapına yakın olan bölgelerdeki kaymanın daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sürtünme katsayısının sabit alınması ve makale kapsamında sunulan kayma bazlı sürtünme katsayısı değişimi modelinin hata payları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak Tablo 4'de verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, diş ve kafa altı bölgesinde tekrarlı sıkım altında sürtünme katsayısının değişmediği varsayımı kullanılarak modellendiğinde tork değeri 25,1Nm olmakta, SLDI modeli kullanıldığında ise 32,6 Nm olarak tespit edilmektedir. Yeni model kullanılarak elde edilen veriler, deneysel verilerden %4,48 oranında sapmaktadır.

Tablo 4. Yüzdesel hata değerleri.

Table 4. Error percentage values.

Model tipi	Tork (Nm)	Kilitleme yükü (kN)	Hata oranı, %
Deneysel 5. sıkım	31,2	18,2	----
Sürtünme değişimi yok	25,1	18,3	%19,5
Kafa ve diş yüzeyi sürtünme tanımı	33,7	18,2	%8,01
SLDI Modeli	32,6	18,2	%4,48

4. Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda elde edilen bulgular, sürtünme katsayısı değişiminin etkisini ortaya koymaktadır. Özellikle, çinko kaplamalı civatalar ile gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değişim trendleri çalışmamız sonucunda elde edilen bulgular ile eşleşmektedir [11]. Modelin oluşturulmasında deneysel verilerin kullanılması ve sürtünme modelinin deneysel çıktılara göre oluşturulması, modelin düşük bir hata payı ile gerçeğe yakın bir sonuç vermesine olanak sağlamıştır. Özellikle, tekrarlı sıkım altında yapılan çalışmalar doğrudan sürtünme katsayısı değişimine odaklanmasına rağmen kümülatif olarak sürtünmenin değişmesi, simülasyon modellerinin mevcut sürtünme modelleri ile bu değişimi yakalamasını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, elde edilen sürtünme modeli, civataların 5 defa kullanılması durumundaki sayısal simülasyon çıktısını düşük bir hata payı ile tahmin etmektedir. Model, kilitleme yükü değişimini, %4,48' lik sapma ile bulabilmiştir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, deneysel testlerin gerçekleştirilmesindeki ekipman desteklerinden dolayı Norm Civata Ar-Ge Merkezine teşekkürlerini sunarlar.

Yazar katkılarının beyanı

İlk yazar, literatür taraması, makale yazımı, deney tasarımı ve analizlerin gerçekleştirilmesi konularında görev almış, ikinci yazar ise metodolojinin geliştirilmesi, düzenlenmesi ve denetlenmesini gerçekleştirmiştir.

Kaynaklar

- [1] Grabon, W.A., Osetek, M., Mathia, T.G. 2018. Friction of Threaded Fasteners, *Tribology International*, Cilt. 118, s. 408-420. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.10.014
- [2] Nassar, S.A., Matin, P.H., Barber, G.C. 2005. Thread Friction Torque In Bolted Joints, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Transactions of the ASME, Cilt. 127, s. 387-393. DOI: 10.1115/1.2042474
- [3] Nassar, S.A., Barber, G.C., Zuo, D. 2005. Bearing Friction Torque In Bolted Joints, *Tribology Transactions*, Cilt. 48, s. 69-75. DOI: 10.1080/05698190590899967
- [4] DIN EN ISO 16047. 2013. Fasteners – Torque/clamp force testing. The International Organization for Standardization
- [5] Nassar, S.A., Yang, X. 2008. Torque-Angle Formulation of Threaded Fastener Tightening, *Journal of Mechanical Design*, Cilt. 130, No.3. DOI: 10.1115/1.2821388
- [6] Nassar, S.A., Zaki, A.M. 2009. Effect of Coating Thickness on the Friction Coefficients and Torque-Tension Relationship in Threaded Fasteners, *Journal of Triboloji*, Cilt. 131, s. 1-11. DOI: 10.1115/1.3085941
- [7] Yu, Q., Zhou, H., Wang, L. 2015. Finite Element Analysis of Relationship Between Tightening Torque and Initial Load of Bolted Connections, *Advances in Mechanical Engineering*, Cilt. 7, No.5. DOI: 10.1177/1687814015588477
- [8] Eliaz, N., Gheorghiu, G., Sheinkopf, H., Levi, O., Shemesh, G., Ben-Mordechai, A., Artzi, H. 2003. Failures of Bolts in Helicopter Main Rotor Drive Plate Assembly Due to Improper Application of Lubricant, *Engineering Failure Analysis*, Cilt. 10, s. 443-451. DOI: 10.1016/S1350-6307(03)00018-9
- [9] Crococo, D., De Agostinis, M., Vincenzi, N. 2012. Influence of Tightening Procedures and Lubrication Conditions on Titanium Screw Joints for Lightweight Applications, *Tribology International*, Cilt. 55, s. 68-76. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.05.010
- [10] Crococo, D., De Agostinis, Fini, S., Olmi, G. 2017. Tribological Properties of Bolts Depending on Different Screw Coatings and Lubrications: An Experimental Study, *Tribology International*, Cilt. 107, s. 199-205. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.11.028
- [11] Eccles, W., Sherrington, I., Arnell, R.D. 2010. Frictional Changes During Repeated Tightening of Zinc Plated Threaded Fasteners, *Tribology International*, Cilt. 43, s. 700-707. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.10.010
- [12] Kumar, M., Persson, E., Sherrington, I., Glavatskih, S. 2022. Changes in Friction of Zinc Flake Coated Threaded Fasteners Due to Humidity, Temperature and Storage Duration, *Tribology International*, Cilt. 170, no. 107498 DOI:10.1016/j.triboint.2022.107498
- [13] Housari, B. A., Nassar, S. A. 2007. Effect of Thread and Bearing Friction Coefficients on the Vibration-Induced Loosening of Threaded Fasteners. *Journal of Vibration and Acoustics*, Cilt. 129, s. 484-494. DOI:10.1115/1.2748473
- [14] Nassar, S.A., El-Khiamy, H., Barber, G.C., Zou, Q., Sun, T.S. 2005. An Experimental Study of Bearing and Thread Friction in Fasteners, *Journal of Triboloji*, Cilt. 127, s. 263-272. DOI:10.1115/1.1843167
- [15] Mackerle, J. 2003. Finite Element Analysis of Fastening and Joining: A Bibliography (1990-2002), *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Cilt. 80, s. 253-271. DOI: doi.org/10.1016/S0308-0161(03)00030-9
- [16] Ganeshmurthy, S., Nassar, S.A. 2014. Finite Element Simulation of Process Control for Bolt Tightening in Joints With Nonparallel Contact, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Cilt.136. DOI:10.1115/1.4025830
- [17] Zadoks, R.I., Kokatam, D.P.R. 2001. Investigation of the Axial Stiffness of a Bolt Using a Three-Dimensional Finite Element Model, *Journal of Sound and Vibration*, Cilt. 246, s. 349-373. DOI:10.1006/jsvi.2001.3651
- [18] MacDermid Enthone Industrial Solutions, Friction Control, <https://industrial.macdermidenthone.com/products-and-applications/anti-corrosion/friction-control> (Erişim Tarihi: 02.12.2023)
- [19] ISO 898-1. 2013. Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel, The International Organization for Standardization
- [20] Jiang, X. J., Hong, J., Shao, G. Q., Zhu, L. B., & Zhu, Y. S. 2014. An Analytical Model for Rotation Stiffness and Deformation of an Antiloosening Nut under Locking Force, *International Journal of Rotating Machinery*, Cilt. 68, no. 410813. DOI: 10.1155/2014/410813
- [21] Zou, Q., Sun, T.S., Nassar, S.A., Barber, G.C., El-Khiamy, H., Zhu, D. 2007. Contact Mechanics Approach to Determine Effective Radius in Bolted Joints, *Journal of Tribology*, Cilt. 127 s. 30-36. DOI:10.1115/1.1829717
- [22] Gong, H., Liu, J., Ding, X. 2016. Calculation of the Effective Bearing Contact Radius for Precision Tightening of Bolted Joints, *Advances in Mechanical Engineering*, Cilt. 8, s. 1-8. DOI: 10.1177/1687814016668445



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Cu Esaslı Metal Matris Kompozit Kaplamaların *Pseudomonas Aeruginosa* ve *Aspergillus Niger* Ortamlarındaki Korozyon Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Corrosion Behavior of Cu-based Metal Matrix Composite Coatings in *Pseudomonas Aeruginosa* and *Aspergillus Niger* Environments

Buğra Karahan ^{1*}, Uğur Malayoğlu ², Kadir Cihan Tekin ³, Aslı Şahiner ⁴

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE

^{2,3} Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İzmir, TÜRKİYE

⁴ Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: karahan.bugra@ogr.deu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada CA (%100 Cu-Al₂O₃), CNZA15 (%85 Cu-Al₂O₃+%15 Ni-Zn-Al₂O₃), CNZA30 (%70 Cu-Al₂O₃+%30 Ni-Zn-Al₂O₃) ve CZA (%100 Cu-Zn-Al₂O₃) olmak üzere 4 farklı kompozisyondaki kaplama tozu kullanılarak farklı kalınlıklardaki Cu esaslı metal matris kompozit (MMK) kaplamalar düşük basınç soğuk dinamik gaz püskürtme (SDGP) prosesi ile 7075 alüminyum alaşımı (AA) üzerinde üretilmiş, kompozisyon ve kalınlığın kaplamaların mikrobiyolojik korozyon davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. X-ışını difraksiyonu (XRD) paternleri ile kaplama tozları ve bu tozlardan üretilen kaplamaların benzer faz içeriklerine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca kaplama prosesi esnasında tozların yüksek sıcaklıklara (T>~300°C) maruz kalmadığı ve termal etkinin herhangi bir faz dönüşümüne neden olmadığı sonucu ortaya çıkarılmış ve enerji dağıtıcı X-ışını spektrometresi (EDS) ile donatılmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak doğrulanmıştır. Diğer taraftan optik mikroskop (OM) ve SEM analizleri ile kaplama mikroyapılarında baskın metal matrisin bakır olduğu ve Al₂O₃ partiküllerinin metal matrisine homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Mikrobiyolojik korozyon testleri bir Gram-negatif bakteri olan *Pseudomonas aeruginosa* ve bir küf türü olan *Aspergillus niger* referans strainleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnkübasyon süresi sonunda en etkili antibakteriyel ve antifungal etkiyi CZA kaplamaları göstermiştir. Ayrıca CZA kaplamaları için *Aspergillus niger* ortamında inhibisyon zonu tespit edilmiş ve zon çapı 7 mm olarak ölçülmüştür. Sonuçlar kaplamaların mikrobiyolojik korozyon davranışları üzerinde kompozisyonun etkili olduğunu ve hem bakteri hem de küf ortamında CZA kaplamalarının başarılı sonuçlar ortaya çıkaracağını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: 7075 AA, SDGP, MMK Kaplama, Mikrobiyolojik Korozyon, *Pseudomonas Aeruginosa*, *Aspergillus Niger*

Abstract

In this study, Cu-based metal matrix composite (MMC) coatings of different thicknesses were produced on 7075 aluminum alloy (AA) by low pressure cold gas dynamic spray (CGDS) process, using coating powders in four different compositions: CA (100% Cu-Al₂O₃), CNZA15 (85% Cu-Al₂O₃+15% Ni-Zn-Al₂O₃), CNZA30 (70% Cu-Al₂O₃+30% Ni-Zn-Al₂O₃) and CZA (100% Cu-Zn-Al₂O₃). The study aimed to investigate the effects of coating composition and thickness on the microbiological corrosion behavior of coatings. X-ray diffraction (XRD) patterns show that the phase contents of the coating powder and the coating produced with the same powder are similar to each other. It was also concluded that the powders were not exposed to high temperatures (T>~300°C) during the coating process and the thermal effect did not cause any phase transformation, and this was confirmed using a scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy-dispersive X-ray spectrometer (EDS). Optical microscope (OM) and SEM analyzes determined that the dominant metal matrix in the coating microstructures was copper and Al₂O₃ particles were homogeneously distributed in the metal matrix. Microbiological corrosion tests were performed using *Pseudomonas aeruginosa* and *Aspergillus niger* reference strains. The results obtained at the end of the incubation period demonstrate that CZA coatings show effective antibacterial activity against bacteria and also provide an antifungal effect by preventing fungus formation. Additionally, an inhibition zone was detected in *Aspergillus niger* medium for CZA coatings and the zone diameter was measured to be 7 mm. These findings indicate that the composition is effective on the microbiological corrosion behavior of coatings and that CZA coatings, in particular, achieve successful results against both bacteria and fungus.

Keywords: 7075 AA, CGDS, MMC Coating, Microbiological Corrosion, *Pseudomonas Aeruginosa*, *Aspergillus Niger*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Due to their unique mechanical properties and low density, aluminum and its alloys play a crucial role in the advancement of

various industries such as aerospace, automotive, defense, among others. This makes them ideal for applications requiring a high strength-to-weight ratio [1]. The corrosion morphology of

aluminum and its alloys primarily manifests as a localized corrosion morphology, encompassing prevalent forms of corrosion such as stress corrosion cracking, pitting corrosion, crevice corrosion, galvanic corrosion, and microbiological corrosion [4,5]. Therefore, effectively enhancing the corrosion resistance of AAs poses a significant scientific challenge in aviation research [6]. Both 7075 AA and 2024 AA are widely employed in the structures and critical components of aircraft. The presence of alloying elements in these metals renders them susceptible to localized corrosion while simultaneously leaving them vulnerable to microbiological corrosion [7]. Microbiological corrosion is a mechanism associated with the corrosion of metal surfaces affected by the physiological processes of microorganisms [8]. It can accelerate various forms of corrosion such as general corrosion, pitting corrosion, crevice corrosion, galvanic corrosion, intergranular corrosion, alloy depletion and stress corrosion cracking [9]. Presently, many civilian and military aircraft fuel tanks are manufactured from AAs [10]. Microorganisms are introduced into fuel tanks through airborne contaminants and ingress of water into the tank [11]. The accumulation of water inside fuel tanks triggers the growth of microorganisms, leading to microbiologically induced corrosion in these tank structures [7]. Particularly in the aviation sector, microbiological corrosion has emerged as a significant type of corrosion that is receiving increased attention [12,13].

Traditional surface treatment methods for aluminum and its alloys include electroplating [15-16,17], anodizing [18,19], and PVD/CVD [20]. Various methods have been proposed to prevent aluminum corrosion, such as electroplating with cerium or silane films, cathodic protection using magnesium-rich coatings, organic coatings, conversion coatings, and polymer coatings [21,22]. The use of these methods is gradually being restricted due to their environmental and human health hazards or high equipment requirements. The rise of ceramic materials offers significant ideas for material protection, such as thermal spraying [25] and laser cladding [26,27]. However, such technology is limited to situations where the adhesion of the film to the substrate and the homogeneity of the film thickness are not absolute. Moreover, there is a risk of altering the microstructure of the substrate material due to the thermal and laser processes [28].

The SDGP was developed in the mid-1980s at the Institute of Applied and Theoretical Mechanics of the Russian Academy of Sciences in Siberia by Professor Anatolii Papyrin and his colleagues [29]. The minimization or complete elimination of high-temperature oxidation, evaporation, melting, crystallization, thermal residual stresses and other common detrimental effects of traditional thermal spraying processes make the SDGP process a promising and evolving technique for numerous industrial applications [30].

In the prevention or delay of microbiological corrosion, naturally occurring substances as well as specific biologically active metals such as Ag, Cu, and Zn offer appropriate options for advanced biomaterials with antibacterial properties. Particularly, the use of copper and copper-based alloys as coatings emerges as a prevalent solution. In this regard, various coating methods are feasible [32]. In a study found in the literature, copper coating on AA was conducted using three different thermal spraying methods: plasma spraying, wire arc spraying, and cold spraying. Among these methods, cold spraying emerged with the least amount of surviving *Staphylococcus aureus* after a 2-hour contact period compared to the other methods [33]. Another study investigated the antimicrobial properties of different transition metals such as silver, nickel, zinc, and copper-modified HA/PEEK

coatings against *Staphylococcus aureus*. The results showed that HA-Ni/PEEK, HA-Cu/PEEK, HA-Zn/PEEK, and HA-Ag/PEEK coatings exhibited a lethal effect on the bacterial population in the control solution in increasing order from minimum to maximum. HA-Ag/PEEK demonstrated the highest antibacterial tendency with the least surviving bacterial population [37].

While there is a sufficient level of research examining the general corrosion behavior of coatings produced by the CGDS process in the literature, studies focusing on their microbiological corrosion activities are limited. This study investigates the microbiological corrosion behaviors of Cu-based coatings and explores the influence of coating composition and thickness on these properties.

Materials and Methods

In the experimental investigations, 7075 AA-T651 was employed as the substrate material, characterized by a chemical composition denoted as (0.29% Fe, 0.08% Si, 0.22% Mn, 0.20% Cr, 0.042% Ti, 1.68% Cu, 2.37% Mg, 5.79% Zn and balance Al) and mechanical properties denoted as (yield strength: 521-544 MPa, tensile strength: 579-604 MPa and elongation: % 9.5-12.4). The 7075 AA in sheet form, measuring 500x500x10 mm, was supplied by Seykoç Aluminum Ltd. To ensure consistent surface quality among all specimens and to enhance mechanical bonding through surface activation before the coating process, sandblasting was executed utilizing the Reitel Sanduret-2K sandblasting device (Megadental GmbH). The sandblasting operation was conducted at a pressure of 3.5 bar, employing alumina particles with a size of 250 µm.

In the fabrication of coatings, commercially available CA, Ni-Zn-Al₂O₃ (NZA) and CZA coating powders, featuring particle diameters within the range of approximately 5-70 µm, were employed. These coating powders were procured from DYMET (Obninsk Center for Powder Spraying, Russia) and exhibit a purity exceeding 99%. Throughout the coating production process, CA and CZA powders were utilized individually. Additionally, powder compositions of CNZA15 and CNZA30 were prepared by mechanically blending CA and NZA powders in specific weight ratios.

Particle size distributions of the powders were assessed using a laser particle size distribution device (HORIBA LA-950). The ZEISS GeminiSEM 560 SEM equipped with an array of secondary electron (SE) and backscattered electron (BE) detectors, along with an EDS attachment, was employed to determine powder morphologies. The SEM analyses were carried out using SE and BE methods at magnification levels of 500x-1000x-2500x. To mitigate electron charging resulting from the low electrical conductivity of the powders, a thin gold-palladium conductive film was applied to the specimens using the Quorum SC7620 sputter coater before SEM analysis. Furthermore, powder morphologies were corroborated by conducting semi-quantitative elemental analysis through point EDS and EDS mapping. The crystal phase components and their relative proportions in the powders were ascertained through XRD using the Rigaku D/max-2200/PC series X-ray diffractometer equipped with an SA-HF3 model X-Ray tube (Cu-K α radiation). Peak fitting was applied to identify the crystalline phases by comparing the angular positions of the peaks with reference models in the International Center for Diffraction Data (ICDD) Powder Diffraction File (PDF2). Concurrently, the composition of the coating powders was cross-referenced with the specifications provided by the supplier company using X'pert High Score Plus software.

The coatings were generated using the commercially accessible DYMET-423 (Obninsk Center for Powder Spraying, Russia) low-pressure CGDS equipment. The following parameters were determined to be applied similarly in all experimental sets: compressed air pressure 8 bar, preheating temperature 300 °C, powder feeding rate 0.3 g/s, traverse speed 10 cm/s, stand-off distance 15 mm, The number of spraying steps was determined as 10 passes and 20 passes, respectively. Spraying operations were carried out using a stationary spray gun, and the specimen moved in the x direction. The movement of the specimen in the x direction is in the form of going and returning and 1 going or 1 returning movement of the specimen is considered as 1 pass (spraying step). The Shimadzu HMV microVickers hardness tester was employed to acquire the through-thickness hardness profile of the coatings. Hardness scanning was conducted from the coating towards the substrate, taking into consideration the trace width in cross-section measurements. Out-of-plane indentations were executed on the coating oriented parallel to the substrate surface, employing a peak load of 0.025 kg (245.2 mN) (HV_{0.025}) and an application time of 10 seconds.

To investigate the microstructure throughout the thickness of the coatings, substrates coated through the CGDS process underwent a sequential process involving sectioning, resin encapsulation and final polishing. Sectioning was executed using a SiC precision cutting disc from Cloeren Technology GmbH, affixed to a Struers Labotom-5 manual cutting machine. Following sectioning, a cold mounting process was conducted using epoxy resin (EpoFix from Struers) at ambient temperature without the application of vacuum. Fine grinding was executed using diamond-coated composite thin grinding discs, known for maintaining flatness and ensuring an effective material removal rate. The final stage of fine grinding involved the use of 2000 grit SiC paper. Subsequently, polishing was carried out utilizing 3 µm diamond paste in an alcohol-based lubricant. The concluding polishing step employed a 50 nm colloidal silica suspension. Microstructural investigations were conducted using the Nikon Eclipse ME600 OM and the ZEISS GeminiSEM 560 SEM.

For microbiological corrosion tests, specimens measuring 1x1 cm and comprising 7075 AA, bulk Cu, CA, CNZA15, CNZA30 and CZA coatings were prepared. These specimens underwent sterilization using UV light before being utilized in the tests. Reference strains were selected for the corrosion tests: *Pseudomonas aeruginosa*, a gram-negative bacterium and *Aspergillus niger*, a fungus species. Subsequently, sterile specimens were placed at the center of the plates and the plates containing bacterial samples and fungus samples were incubated for a period of 4 weeks. After incubation, the specimens were cleaned of organism and medium residues. The presence and severity of microbiological corrosion were evaluated visually.

Results and Discussion

These results indicate that the coating powders exhibit particle size distribution ranges consistent with the requirements of the CGDS process. Additionally, it was observed that the highest particle size was measured in NZA powder, while the lowest was in CZA powder. The conducted studies revealed that each coating powder component possesses a distinct morphology and material types were identified through EDS analyses. In this context, it was determined that copper exhibits a dendritic morphology, alumina displays an angular morphology, nickel features a spongy morphology and zinc possesses a spherical morphology. All XRD patterns exhibited matches consistent with the analyzed composition and no unexpected phases were detected. Dominant phases in all coating powders, except for NZA

powder, were identified as Cu and Al₂O₃. In NZA powder, the dominant phases were found to be Ni and Al₂O₃.

Microstructure formations of metal and ceramic components in the coating powder were identified based on regions of different colors in the coating images. The results indicated that the dominant metal matrix in the coating microstructures is copper and Al₂O₃ particles are uniformly distributed in the metal matrix. When evaluating the coating thicknesses, it was observed that the highest coating thicknesses were obtained in CNZA coatings. This observation is particularly associated with the positive contribution of nickel in the NZA powder added to the CA powder, which, during coating production, embeds into the Cu matrix with relatively lower hardness, thereby contributing to an increase in coating thickness. The highest hardness values were obtained in CNZA coatings, attributed to the presence of the Ni component in the coating; the lowest values were found in CZA coatings. Hardness values for all coatings except CNZA30 coatings were below the hardness value of the 7075 AA used as the substrate material. The examined XRD patterns indicated that the phase contents of the powder material and the coating produced with the same powder were similar, with no peaks corresponding to any phase other than the components present in the feed powders.

Upon examining the petri dish specimens after the incubation period, it was observed that dark green CuO (cupric oxide) formation occurred in the bulk Cu, CA, CNZA15, and CNZA30 specimens on the growth medium containing *Pseudomonas aeruginosa*. Particularly, in the petri dish where bulk Cu was present, the color of the growth medium shifted from yellow to dark green. No significant changes were observed for the 7075 AA and CZA specimens. When evaluating the specimens on the growth medium containing *Aspergillus niger*, intense fungus growth was observed around all specimens except for bulk Cu. The antifungal effect and inhibition zone were limited for bulk Cu, while notably impressive results were obtained for the CZA coating.

Following the initial visual examination, the specimens were thoroughly cleaned of microbial residues and growth medium remnants to investigate the effects and severity of the microbiological corrosion phenomenon in detail. In the *P. aeruginosa* environment, microbiological corrosion effects were observed in all specimens except CZA. In the *A. niger* environment, general corrosion effects were observed on the surfaces of the 7075 AA and bulk Cu specimens. However, for Cu-based coatings no signs of corrosion were detected, the coating-substrate interface remained unaffected by corrosion and coating integrity was preserved.

Conclusion

- The average particle size values for CA, NZA, CNZA15, CNZA30 and CZA coating powders are determined as 25.30 µm, 27.28 µm, 25.68 µm, 26.81 µm and 22.33 µm, respectively.
- It has been discerned that each component in the coating powders exhibits a distinct morphology. In this context, copper has been identified to possess a dendritic morphology, aluminum exhibits an angular morphology, nickel displays a spongy morphology and zinc is determined to have a spherical morphology.
- The XRD patterns of the coating powders exhibited matches consistent with the analyzed composition and no unexpected phases were detected. In all coating powders except for NZA, the dominant phases were identified as Cu and Al₂O₃. In NZA powder, the dominant phases were found to be Ni and Al₂O₃. Additionally, as expected, Ni phase was detected in CNZA15 and CNZA30

powders, while Zn phase reached significant intensity values in CZA powder. Quantitative analyses were conducted on coating powders to compare with the manufacturer's specifications. The obtained results indicate that the ingredients and their percentage ratios in the coating powders are consistent with the manufacturer's specifications.

- It has been determined that the dominant metal matrix in the coating microstructures is copper and the Al_2O_3 particles are uniformly distributed within the metal matrix.
- The XRD patterns, microstructure analyses and EDS results have indicated that the phase contents of the powder material and the coatings produced with the same powder are similar. It has been revealed that, due to the inherent nature of the CGDS process, the powders do not undergo high temperatures during the spraying process and there is no thermal effect causing any phase transformation. Simultaneously, no diffraction peaks indicative of oxidation or chemical reaction have been detected.
- The highest coating thickness (277.4 μm) and the highest hardness value (192 $HV_{0.025}$) were observed in CNZA30 20p coatings, while the lowest coating thickness (37.44 μm) and the lowest hardness value (87 $HV_{0.025}$) were detected in CZA 10p coatings. Additionally, the number of spraying steps has exerted a positive influence on coating thickness, while it did not lead to a significant change in hardness values.

- The microbiological corrosion analysis results have indicated that, compared to the *A. niger* growth medium, the specimens were more affected in the *P. aeruginosa* growth medium.
- In the *P. aeruginosa* growth medium, the formation of dark green CuO (cupric oxide) was observed in specimens other than 7075 AA and CZA. Specifically, it was noted that the growth medium color changed from yellow to dark green, especially where bulk Cu was present.
- When evaluating the specimens in the *A. niger* growth medium, it was observed that, except for bulk Cu, all other specimens exhibited dense fungus growth in their vicinity. Additionally, in the CZA specimen, an antifungal effect and an inhibition zone were identified, with a measured zone diameter of 7 mm.
- In the *P. aeruginosa* environment, microbiological corrosion effects were observed in all specimens except for CZA. In the *A. niger* environment, general corrosion effects were observed on the surfaces of 7075 AA and bulk Cu specimens. However, no signs of corrosion were detected for any of the Cu-based coatings. Among the coatings, only CZA showed no indication of microbiological corrosion in both bacterial and fungus growth environments, demonstrating the best antibacterial and antifungal effects, which were associated with the significant amount of Zn present in the coating composition.

1. Giriş

Alüminyum ve alaşımları, benzersiz mekanik özellikleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle uzay, havacılık, otomotiv, savunma sanayi gibi çeşitli endüstrilerin ilerlemesinde çok önemlidir ve bu da onları yüksek mukavemet-ağırlık oranı gerektiren uygulamalar için ideal kılar [1]. Alüminyum alaşımları uzun zamandır uçak yapılarında kullanılan ana malzemeler olup; yüksek mukavemetli 2XXX alaşımları ve ultra yüksek mukavemetli 7XXX alaşımları en yaygın kullanılanlarıdır [2]. 7XXX alaşımlarının yüksek spesifik mukavemetleri, yüksek spesifik sertlikleri, yüksek toklukları, mükemmel işleme ve kaynak performansları doğrultusunda uçak şasisleri, direkler ve kirişler gibi taşıyıcı bileşenlerdeki yaygın kullanımları onları havacılıkta önemli bir yapısal malzeme haline getirmiştir [3]. Bununla birlikte, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları korozyona karşı hassastır [2].

Alüminyum ve alaşımlarının korozyon morfolojisi esasen lokalize bir korozyon morfolojisidir ve yaygın korozyon biçimleri arasında gerilmeli korozyon çatlağı, çukurcuk korozyonu, aralık korozyonu, galvanik korozyon ve mikrobiyolojik korozyon bulunmaktadır [4,5]. Bu nedenle AA'larının korozyon direncinin etkili bir şekilde nasıl iyileştirileceği, havacılık araştırma alanında önemli bir bilimsel problemdir [6]. 7075 AA ve 2024 AA, uçakların hem yapılarında hem de hassas kısımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metallerdeki alaşım elementlerinin varlığı, onları lokalize korozyona karşı duyarlı hale getirirken aynı zamanda mikrobiyolojik korozyona karşı savunmasız hale getirir [7]. Mikrobiyolojik korozyon, mikroorganizmaların fizyolojik süreçlerinden etkilenen metal yüzeylerin korozyonu ile ilişkilendirilen bir mekanizmadır [8]. Mikrobiyolojik korozyon; genel korozyon, çukurcuk korozyonu, aralık korozyonu, galvanik korozyon, taneler arası korozyon, alaşım giderme ve gerilmeli korozyon çatlağı gibi birçok korozyon biçimini hızlandırabilir [9]. Günümüzde, sivil ve askeri uçak yakıt tanklarının birçoğu AA'lardan üretilmektedir [10]. Mikroorganizmalar yakıt tanklarına havadaki kirleticilerden ve tanka giren su yoluyla sokulur [11]. Yakıt depolarının içinde biriken su mikroorganizmaların büyümesini tetikler ve bu tank yapılarında

mikrobiyolojik korozyona yol açabilir [7]. Özellikle havacılık sektöründe mikrobiyolojik korozyon, dikkat edilmeye başlanan önemli bir korozyon çeşidi haline gelmiştir. Havacılık endüstrisinde, anaerobik kükürt azaltıcı, demir oksitleyici, mangan oksitleyici ve asit üreten bakteriler gibi çeşitli bakteri ve mantar gruplarını içeren jet yakıtları hat sisteminin mikrobiyolojik kontaminasyonu, en az 40 yıldır bir sorun olarak bildirilmiştir [12-13,14].

Alüminyum ve alaşımlarının geleneksel yüzey işleme yöntemleri arasında elektrokaplama [15-16,17], anotlama [18,19] ve PVD / CVD [20] bulunmaktadır. Alüminyum korozyonunu önlemek için seryum veya silan filmleri ile elektrokaplama, Mg açısından zengin bir kaplama kullanarak katodik koruma, organik kaplama, dönüşümlü kaplama ve polimer kaplama gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir [21,22]. Anotlama, korozyondan korunma için en pratik yöntemlerden biri olarak kabul edilir. Anotlama, alüminyum yüzeyin üzerinde nanogözenekli bir oksit tabakası oluşturur [23,24]. Bahsi geçen yöntemlerin çevre ve insan sağlığına zararları veya yüksek ekipman gereksinimleri nedeniyle yavaş yavaş kullanımları sınırlanmaktadır. Seramik malzemelerin yükselişi, termal püskürtme [25] ve lazerle kaplama [26,27] gibi malzeme koruması için önemli fikirler sunmaktadır. Bu tür bir teknoloji, yalnızca filmin substrat yapışmasının ve film kalınlığının homojenliğinin mutlak olmadığı durumlarda sınırlıdır. Bununla birlikte termal ve lazer işlemlerin beraberinde getirdiği ısı etkileri ile altlık malzemenin iç yapısının değişme riski söz konusudur [28].

SDGP prosesi, 1980'lerin ortalarında Sibirya'daki Rus Bilimler Akademisi'nin Uygulamalı ve Teorik Mekanik Enstitüsü'nde Profesör Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir [29]. SDGP veya basitçe soğuk püskürtme prosesi, metalik veya dielektrik bir altlığa, sıkıştırılmış bir gazın süpersonik jeti tarafından hızlandırılan küçük (1-50 μm) parçacıkların yüksek hızlı (300-1200 m/s) jetine maruz bırakarak kaplamaların uygulanması sürecidir. Bu noktada yüksek sıcaklık oksidasyonu, buharlaşma, erime, kristalleşme, termal kalıntı gerilmeleri ve geleneksel termal püskürtme

işlemlerinin diğer yaygın zararlı etkilerinin en aza indirilmesi veya tamamen ortadan kaldırılması, SDGP prosesini birçok endüstriyel uygulama için gelişime açık ve umut verici bir teknik haline getirmektedir [30]. Buna ek olarak SDGP prosesi ve elde edilen kaplamalar; yüksek birikme verimi, yüksek birikme hızı, altlığa termal enerji girişinin minimum olması, toz malzemenin erimemesi, yüksek yoğunluk, düşük gözenek, iyi yapışma mukavemeti, basma artık gerilmeleri, çok kalın kaplamaların üretilmesi, faz dönüşümü olmaması, oksitlenme olmaması, tane irileşmesi olmaması, yüksek iletkenlik, yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet ve sertlik gibi avantajlara sahiptir [31].

Mikrobiyolojik korozyonun önlenmesi veya geciktirilmesi ile ilgili olarak doğada bulunan ürünlerin yanı sıra Ag, Cu ve Zn gibi belirli biyoaktif metaller, antibakteriyel ajanlara yönelik gelişmiş biyomateryaller için uygun seçenekler sunmaktadır. Özellikle bakır ve bakır esaslı alaşımların kaplama olarak kullanılması yaygın bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Bu noktada farklı kaplama yöntemlerinin kullanımı mümkündür [32]. Literatürde yer alan bir çalışmada AA üzerine bakır kaplama işlemi plazma püskürtme, tel ark püskürtme ve soğuk püskürtme olmak üzere üç farklı termal püskürtme yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Soğuk püskürtme, diğer yöntemlere kıyasla 2 saatlik temas sonucunda hayatta kalan en az *Staphylococcus aureus* miktarıyla ön plana çıkmıştır [33]. Diğer bir çalışmada altlık üzerine elektrokaplama yoluyla bakır gözenekli malzemeler hazırlanmıştır. Sonuçlar, bakır gözenekli malzemelerin *Escherichia coli*'ye karşı çok güçlü antibakteriyel aktivite sergilediğini göstermiştir [34]. Bir başka çalışmada bakır, bakır alaşımları (CuNi35, CuSn10) ve Cu-TiO₂10 bakır kompozit kaplamalar plazma püskürtme yoluyla altlık üzerine biriktirilmiştir. Tüm kaplamaların özellikle Gram-negatif bakteriler türlerine karşı yeterli antibakteriyel aktivite gösterdiği doğrulanmıştır [35]. Benzer çalışma grubu tarafından mikrobiyolojik korozyonun önlenmesi veya geciktirilmesine yönelik 3 farklı çalışma yürütülmüştür. İlk çalışmada farklı oranlarda Al/ZnO tozu kullanılarak SDGP prosesi ile Al/ZnO kaplamalar elde edilmiş, toz besleme stoğu ve kaplamadaki ZnO nanotoz konsantrasyonunun artmasıyla antibakteriyel aktivitede önemli bir artışın meydana geldiği tespit edilmiştir [36]. Diğer çalışmada gümüş, nikel, çinko ve bakır ile değiştirilmiş HA/PEEK kaplamalar gibi farklı geçiş metallerinin *Staphylococcus aureus*'a karşı antimikrobiyal özellikleri incelenmiştir. Numunelerin kontrol çözeltisine karşı öldürücü etkisi minimumdan maksimuma olmak üzere sırasıyla HA-Ni/PEEK, HA-Cu/PEEK, HA-Zn/PEEK, HA-Ag/PEEK şeklinde sonuçlanmış, HA-Ag PEEK hayatta kalan en az bakteri popülasyonu ile maksimum antibakteriyel eğilim sergilemiştir [37]. Son çalışmada 6061 substratı üzerine soğuk püskürtme ZnO/Titanyum kompozit kaplamanın biyouyumluluğu ve antibakteriyel özellikleri incelenmiştir. Biyouyumluluk testi için osteoblast hücresi, antibakteriyel çalışmada ise *Escherichia coli* (DH5 α) kullanılmıştır. ZnO/Ti kaplamaların *E. coli*'ye karşı önemli antibakteriyel etkiler sağladığı ve ZnO konsantrasyonunun artmasıyla hücre canlılığının azaldığı tespit edilmiştir [38] Literatürde yer alan bir başka çalışmada antimikrobiyal uygulamalar için geleneksel ve nanomalzeme bakır soğuk sprey yüzeylerindeki korozyonun etkisi araştırılmıştır. Nanomalzeme Cu, geleneksel Cu'ya göre daha küçük tane boyutuna ve dolayısıyla daha büyük tane sınırlarına sahip olduğu için korozyon hızına katkıda bulunan iyon salınımının artmasına yol açmıştır. Geleneksel Cu ile karşılaştırıldığında nanomalzeme Cu'nun iyon salınımının ve korozyon hızının artmasının, *Influenza A* Virüsünün temasla öldürülmesinde artan antimikrobiyal etkinliğine doğrudan katkıda bulunduğu anlaşılmıştır [39].

Literatürde SDGP prosesi ile üretilen kaplamaların genel korozyon davranışlarının incelenmesine yönelik yeterli düzeyde çalışma mevcuttur. Bununla birlikte mikrobiyolojik korozyon etkinliklerine yönelik yürütülen çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmada Cu esaslı kaplamaların mikrobiyolojik korozyon davranışları incelenmiş, ayrıca kaplama kompozisyonunun ve kaplama kalınlığının söz konusu özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Numune hazırlama

Altlık malzeme olarak % kimyasal bileşimi (0,29 Fe, 0,08 Si, 0,22 Mn, 0,20 Cr, 0,042 Ti, 1,68 Cu, 2,37 Mg, 5,79 Zn ve geriye kalan Al) ve mekanik özellikleri (akma mukavemeti: 521-544 MPa, çekme mukavemeti: 579-604 MPa ve uzama: % 9,5-12,4) şeklinde olan 7075-T651 AA kullanılmıştır. Levha formundaki 7075 AA, 500x500x10 mm ölçülerinde Seykoç Alüminyum Ltd. tarafından tedarik edilmiştir. Numunelerin kaplama tezgahına uygun bir şekilde montajının yapılabilmesi için tedarik edilen levha formundaki 7075 AA, lazer kesim ile yaklaşık ölçülerde kesilmiş ve tel erezyon ile final ölçülerine (41,5x41,5x2mm) getirilerek hassas bir şekilde hazırlanmıştır. Tüm numunelerin benzer bir yüzey kalitesine sahip olması, kaplama işlemi öncesinde yüzeyin etkinleştirilmesi ve mekanik bağlanmanın artırılması için Reitel Sanduret-2K (Megadental GmbH) kumlama cihazı ile kumlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kumlama işlemi 3,5 bar basınç ve 250 μ m boyutundaki alümina partikülleri ile yürütülmüştür. Kumlama işlemi sonrası numunelerin yüzey pürüzlüğü Ra: 1,90 μ m ve Rz: 14,4 μ m olarak tespit edilmiştir.

2.2. Toz hazırlama

Bu çalışma kapsamında ticari olarak temin edilebilen, partikül çapı ~5-70 μ m arasında değişiklik gösteren, DYMET Ltd. (Obninsk Toz Püskürtme Merkezi, Rusya) tarafından tedarik edilen ve %99'dan daha yüksek saflığa sahip Cu-Al₂O₃ (CA), Ni-Zn-Al₂O₃ (NZA) ve Cu-Zn-Al₂O₃ (CZA) kaplama tozları kullanılmıştır. Kaplama üretimleri esnasında CA ve CZA tozları tek başına kullanılmış, buna ek olarak ağırlıkça belirli oranlardaki CA ve NZA tozları mekanik olarak karıştırılarak %85 Cu-Al₂O₃+%15 Ni-Zn-Al₂O₃ (CNZA15) ve %70 Cu-Al₂O₃+%30 Ni-Zn-Al₂O₃ (CNZA30) toz kompozisyonları hazırlanmıştır.

2.3. Kaplama prosesi

Kaplamaların üretilmesinde ticari olarak temin edilebilen DYMET-423 (Obninsk Toz Püskürtme Merkezi, Rusya) düşük basınç SDGP ekipmanı kullanılmıştır. Püskürtme işlemi esnasında uygulanan proses parametreleri; sıkıştırılmış hava basıncı 8 bar, ön ısıtma sıcaklığı 300 °C, toz besleme hızı 0,3 g/s, nozül hareket hızı 10 cm/s, püskürtme mesafesi 15 mm, püskürtme adım sayısı 10 tur (10t) ve 20 tur (20t) olarak belirlenmiştir. Püskürtme işlemleri nozül sabit, numune yatay yönde hareketli olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Numunenin yatay yöndeki hareketi gidiş ve dönüş şeklinde olup, numunenin tamamladığı 1 gidiş veya 1 dönüş hareketi 1 tur (püskürtme adım sayısı) olarak kabul edilmiştir. Toz kompozisyonu, püskürtme adım sayısı ve kaplama bilgilerini içeren deney setleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Cu esaslı kaplamaların üretimine yönelik hazırlanan deney setleri.**Table 1.** Experimental sets considered in the production of Cu-based coatings.

Deney Seti	Toz kompozisyonu	Püskürtme adım sayısı (tur)	Kaplama
1	Cu-Al ₂ O ₃	10	CA 10t
2	Cu-Al ₂ O ₃	20	CA 20t
3	%85 Cu-Al ₂ O ₃ +%15 Ni-Zn Al ₂ O ₃	10	CNZA15 10t
4	%85 Cu-Al ₂ O ₃ +%15 Ni-Zn Al ₂ O ₃	20	CNZA15 20t
5	%70 Cu-Al ₂ O ₃ +%30 Ni-Zn Al ₂ O ₃	10	CNZA30 10t
6	%70 Cu-Al ₂ O ₃ +%30 Ni-Zn Al ₂ O ₃	20	CNZA30 20t
7	Cu-Zn-Al ₂ O ₃	10	CZA 10t
8	Cu-Zn-Al ₂ O ₃	20	CZA 20t

2.4. Toz karakterizasyonu

Kaplama tozlarının partikül boyut dağılımları, lazer partikül boyut dağılım cihazı (HORIBA LA-950) ile ölçülmüştür. Toz morfolojilerinin tespiti için ZEISS GeminiSEM 560 SEM kullanılmış, 500x-1000x-2500x büyütmedeki çalışmalar ikincil elektron ve geri saçılmış elektron yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaplama tozları için EDS haritalama ve noktasal EDS ile yarı kantitatif elementel analiz yürütülmüş ve toz morfolojilerinin hangi bileşene ait olduğu doğrulanmıştır. Tozların kristal faz bileşenleri ve bunların bağlı miktarları, XRD analizleri sonucunda tespit edilmiştir. Bu çalışmada tozların faz bileşenleri, SA-HF3 model X-Ray tüpü (Cu-K α radyasyonu) ile donatılmış Rigaku D/max-2200/PC serisi X-ışını difraktometresi kullanılarak incelenmiştir. XRD spektrumunun kaydedilmesinden sonra, piklerin açıl konumları uluslararası difraksiyon data merkezi (ICDD) toz kırınımı dosyasındaki (PDF2) referans modelleriyle karşılaştırılarak mevcut kristal fazları tanımlamak için pik uydurma yapılmıştır. Aynı zamanda kaplama tozlarının kompozisyonu X'pert High Score Plus yazılımı kullanılarak belirlenmiştir.

2.5. Kaplama karakterizasyonu

Kaplamaların kalınlık boyunca mikro yapısını incelemek için SDGP ile kaplanmış altıklar kesitlere ayrılmış, reçineye alınmış ve son olarak parlatılmıştır. Kesit alma işlemi, Struers Labotom-5 manuel kesme makinesine monte edilmiş SiC hassas kesme diski (Cloeren Technology GmbH) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesit alma sonrasında, epoksi reçine (Struers, EpoFix) ile soğuk kalıba alma işlemi, vakum uygulanmadan ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, düzgünlüğü koruyan ve iyi bir malzeme kaldırma oranı sağlayan kompozit ince taşlama diskleri üzerinde elmas kullanılarak hassas zımparalama gerçekleştirilmiştir. Hassas zımparalama 2000 grit SiC kağıtla tamamlanmıştır. Daha sonra alkol bazlı bir yağlayıcı içinde 3 μ m elmas pasta kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Final parlatma işlemi 50 nm kolloidal silika süspansiyonu ile yapılmıştır.

Mikroyapısal inceleme için Nikon Eclipse ME600 OM ve ZEISS GeminiSEM 560 SEM kullanılmıştır. Üretilen kaplamalar açık gözenek içeren pürüzlü bir üst yüzeye sahip olduğundan, OM ve SEM ile kaplamaların yalnızca parlatılmış kesitleri incelenmiştir.

OM ile incelemelerde 100x, 200x ve 500x büyütme mikroyapı görselleri elde edilmiş, SEM incelemelerinde ise 500x ve 1000x büyütmede çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca üretilen kaplamalar için EDS haritalama ve noktasal EDS ile yarı kantitatif elementel analiz gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların kalınlık boyunca sertlik profilini elde etmek için Shimadzu HMV mikroVickers sertlik test cihazı kullanılmıştır. Altlık yüzeyine paralel yönlendirilmiş kaplama üzerinde 0,025 kg (245,2 mN) (HV_{0.025}) bir pik yükünde ve 10 saniye uygulama süresiyle indentasyon yapılmıştır. Kaplamaların kristal faz bileşenleri ve bunların bağlı miktarları, XRD metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, kaplamaların faz bileşenleri, SA-HF3 model X-Ray tüpü (Cu-K α radyasyonu) ile donatılmış Rigaku D/max-2200/PC serisi X-ışını difraktometresi kullanılarak incelenmiştir. XRD spektrumunun kaydedilmesinden sonra, piklerin açıl konumları uluslararası difraksiyon data merkezi (ICDD) toz kırınımı dosyasındaki (PDF2) referans modelleriyle karşılaştırılarak mevcut kristal fazları tanımlamak için pik uydurma yapılmıştır.

2.6. Mikrobiyolojik korozyon testleri

Mikrobiyolojik korozyon testleri için 1x1 cm ölçülerinde 7075 AA, saf Cu plaka ve Cu esaslı kaplamalardan oluşan numuneler hazırlanmıştır. Mikrobiyolojik korozyon testlerine saf Cu plaka da dahil edilerek kaplama & saf malzeme konfigürasyonlarının korozyon üzerinde ne derecede fark yarattığının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Askeri veya sivil uçakların korozyon kaynaklı bozulmasına ilişkin çok sayıda rapor, bu durumun yakıt depolama tankları ve uçak kanadı tanklarının içindeki kontaminasyondan kaynaklanan mikrobiyolojik büyümeyle ilişkili olduğunu ortaya çıkarmıştır [7]. Literatürde yer alan bir çalışmada jet yakıtı ortamında gelişen yaygın mikroorganizmalar tespit edilmiş ve Tablo 2'de verilmiştir [40]. Tablo 2'de yer alan bakteri ve funguslar göz önünde bulundurularak korozyon testlerinde bir gram negatif bakteri olan *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 15442 ve bir küf türü olan *Aspergillus niger* ATCC 6275 referans strainleri kullanılmıştır. *P. aeruginosa* Trytic Soy Agar (TSA, Merck, pH:7,3) besiyerinde 37 °C'de 24 saat geliştirilmiş ve fosfat tamponu (PBS, pH:7,2) kullanılarak süspansiyon hazırlanmıştır. Süspansiyonun yoğunluğu densitometre ile 0,5 McFarland değerine ayarlanmıştır. *A. niger* Malt Extract Agar (MEA, Merck, pH:5,6) besiyerinde 25 °C'de 7 gün geliştirilmiş ve 10⁶ spor/mL olacak şekilde Thoma lamı yardımıyla spor süspansiyonu hazırlanmıştır. Önceden dökülerek katılaştırılmış Trytic Soy Agar plaklarına *P. aeruginosa* süspansiyonundan, Malt Extract Agar plaklarına ise *A. niger* spor süspansiyonundan 100 μ L aktararak L baget ile yayılmıştır. Oda sıcaklığında 30 dk bekletilerek süspansiyonların besiyerine difüze olması sağlanmıştır. Ardından steril numuneler petrilere merkezine yerleştirilerek bakteri içeren petrilere 37 °C'de, küf içeren petrilere ise 25 °C'de 4 hafta boyunca inkübasyona bırakılmıştır.

Tablo 2. Jet yakıtı ortamında yaygın olarak görülen mikroorganizmalar [40].**Table 2.** Microorganisms commonly observed in the jet fuel environment [40].

Bakteri	Fungi	Maya
<i>Bacillus</i>	<i>Hormoconis resiniae</i>	<i>Candida</i>
<i>Micrococcus</i>	<i>Aspergillus</i>	
<i>Pseudomonas</i>	<i>Fusarium</i>	
<i>Arthrobacter</i>	<i>Penicillium</i>	

3. Bulgular ve Tartışma

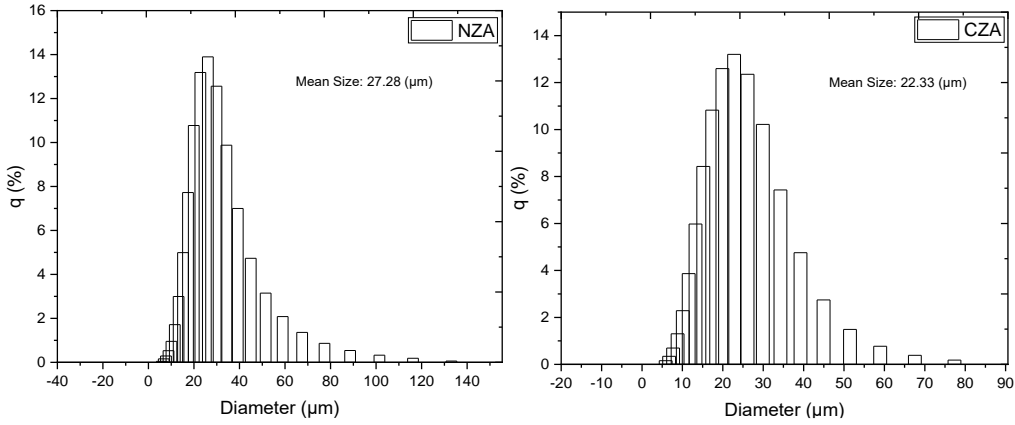
3.1. Kaplama tozlarının karakterizasyonu

Partikül boyut dağılım analizleri en az 3 tekrarlı ölçümler sonucunda gerçekleştirilmiş, CA, NZA, CNZA15, CNZA30 ve CZA kaplama tozları için ortalama partikül boyut değerleri sırasıyla 25,30 μm , 27,28 μm , 25,68 μm , 26,81 μm ve 22,33 μm olarak tespit edilmiştir. Partikül boyutunun en yüksek NZA tozunda, en düşük ise CZA tozunda olduğu belirlenmiş ve bu tozlara ait partikül boyut dağılım grafikleri Şekil 1’de verilmiştir.

Kaplama tozlarına yönelik SEM analizleri yürütülmüş, kaplama tozlarındaki her bir bileşenin farklı toz morfolojisine sahip olduğu ortaya çıkarılmış, EDS haritalama ve noktasal EDS ile

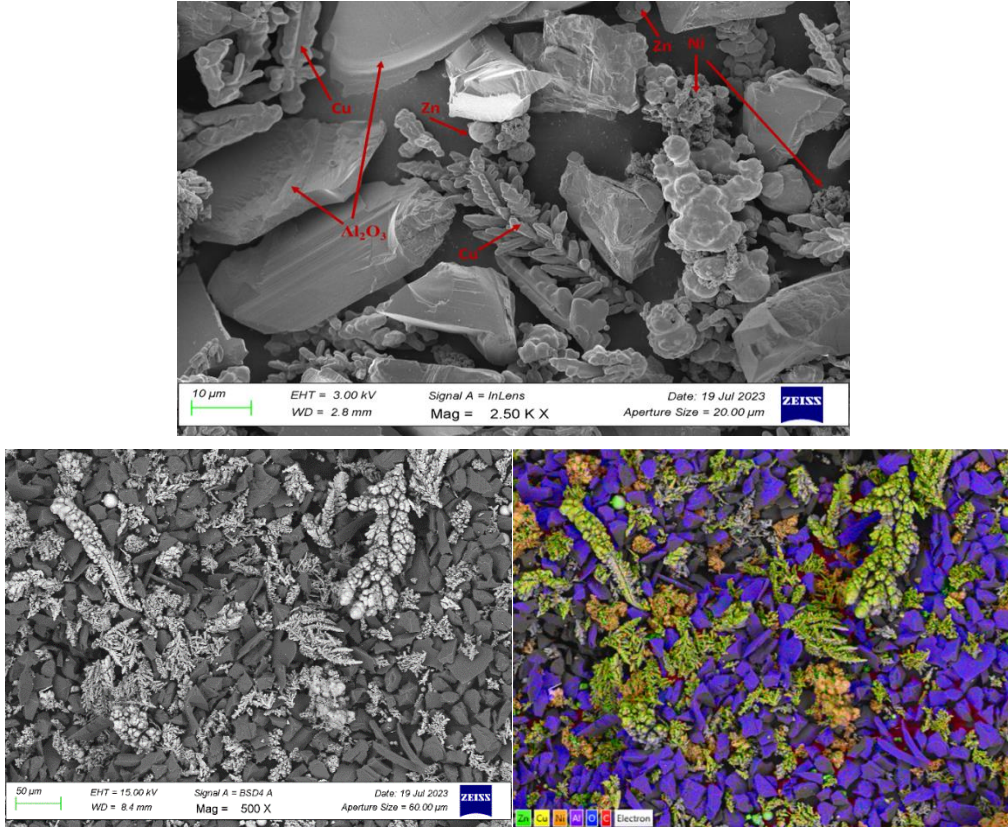
malzeme türleri belirlenmiştir. Buna göre bakırın dentritik bir morfolojiye, alüminanın köşeli bir morfolojiye, nikelin süngersi bir morfolojiye ve çinkonun küresel bir morfolojiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kaplama tozları arasında tüm bileşenleri içeren CNZA30 tozuna ait SEM görüntüleri ve EDS haritalama çıktıları örnek olarak Şekil 2’de verilmiştir.

Ayrıca kaplama tozları ile ilgili olarak yürütülen noktasal EDS çalışması sonucunda toz kompozisyonları içerisinde yer alan her bir bileşen ve sahip olduğu morfoloji doğrulanmış, bu çalışmada kullanılan kaplama tozları arasında tüm bileşenleri içeren CNZA30 tozuna ait analiz çıktısı örnek olarak Şekil 3’te verilmiştir.



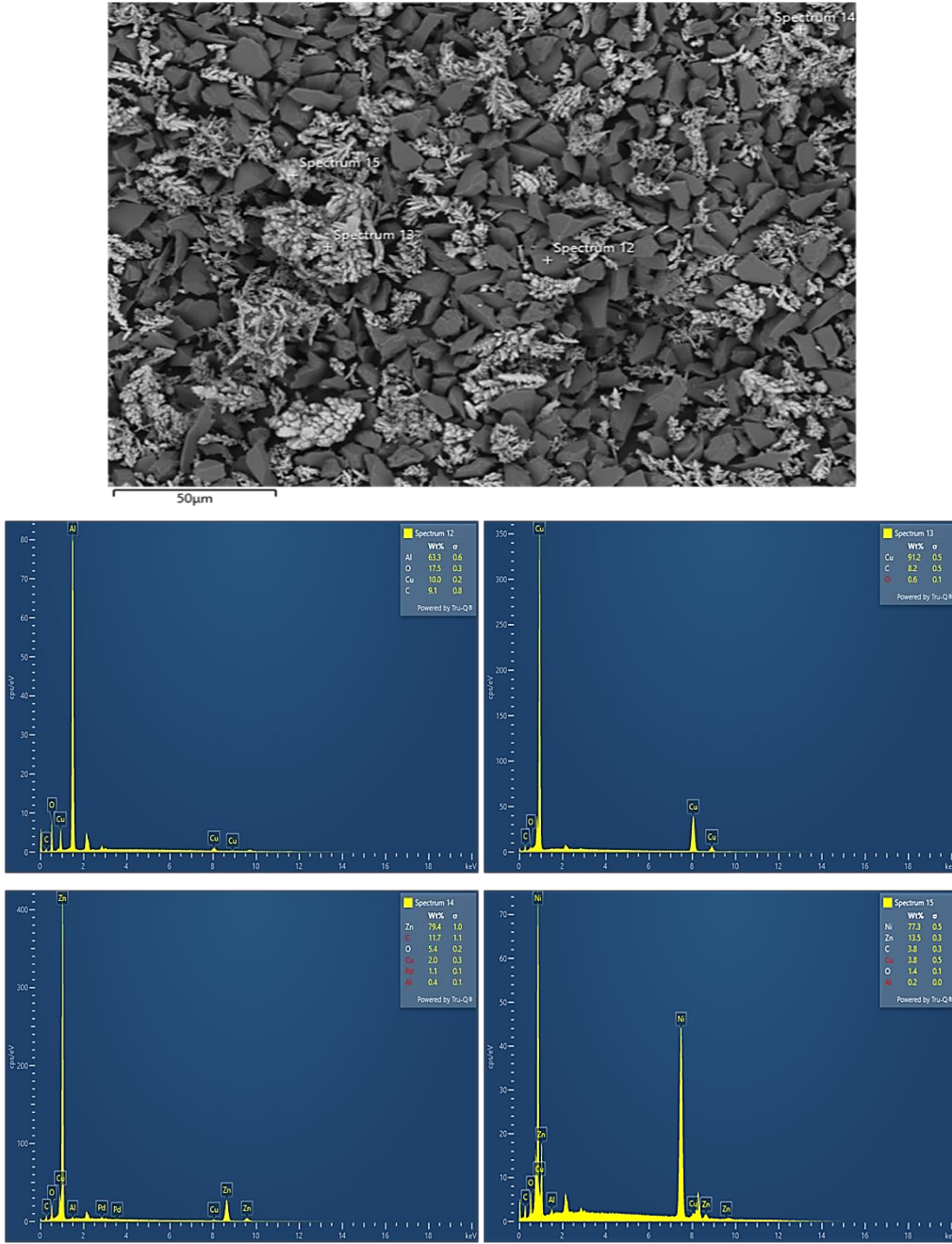
Şekil 1. NZA ve CZA tozlarının partikül boyut dağılım grafikleri.

Figure 1. Particle size distribution graphs of NZA and CZA coating powder.



Şekil 2. CNZA30 tozuna ait SEM görüntüleri ve EDS haritalama çıktıları.

Figure 2. SEM images and EDS mapping outputs of CNZA30 coating powder.

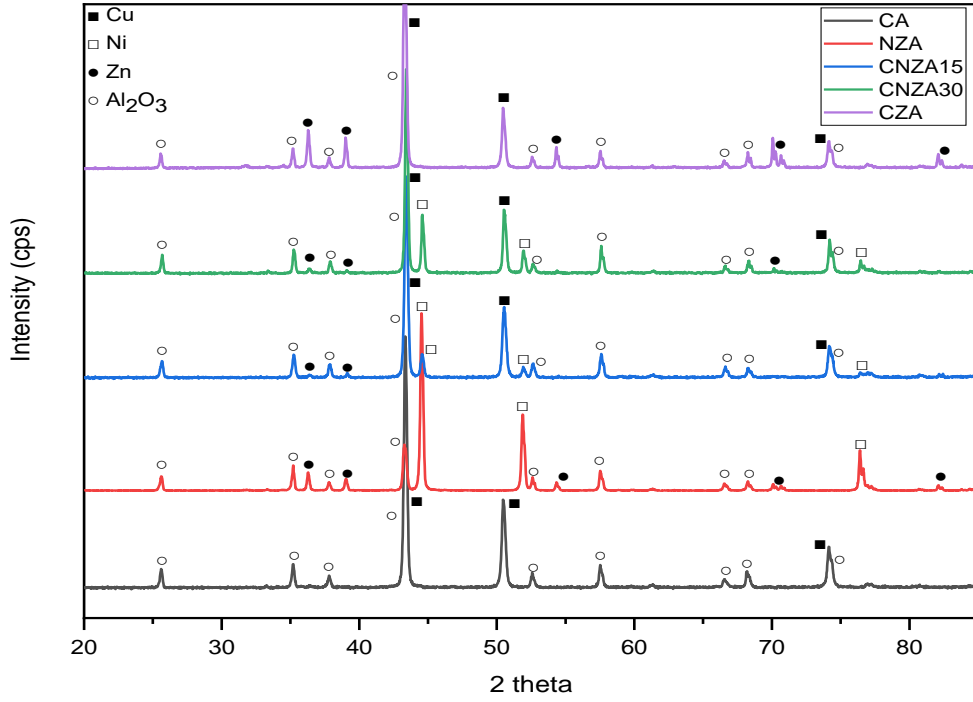


Şekil 3. CNZA30 tozuna ait noktasal EDS çıktıları.

Figure 3. Results of point EDS analysis for CNZA30 powder.

Kaplama tozlarına ait XRD paternleri Şekil 4'te verilmiştir. Tüm paternler analiz edilen bileşime uygun olarak eşleşme göstermiş ve beklenenin haricinde bir faz tespit edilmemiştir. NZA tozu dışındaki tüm kaplama tozlarında baskın fazların Cu ve Al_2O_3 olduğu, NZA tozunda ise baskın fazların Ni ve Al_2O_3 olduğu görülmüştür. Aynı zamanda CNZA15 ve CNZA30 tozlarında

beklenildiği üzere Ni fazı belirlenmiş, CZA tozunda Zn fazı daha yüksek şiddet değerlerinde tespit edilmiştir. Ayrıca kaplama tozlarının kantitatif analizleri gerçekleştirilmiş ve toz kompozisyonu içerisinde yer alan bileşenlerin yüzdesel oranları tespit edilerek Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 4. CA, NZA, CNZA15, CNZA30 ve CZA tozlarının XRD paternleri.

Figure 4. XRD patterns of CA, NZA, CNZA15, CNZA30 and CZA coating powders.

Tablo 3. CA, NZA, CNZA15, CNZA30 ve CZA kaplama tozlarına ait kantitatif analiz sonuçları.

Table 3. Quantitative analysis results for CA, NZA, CNZA15, CNZA30 ve CZA coating powders.

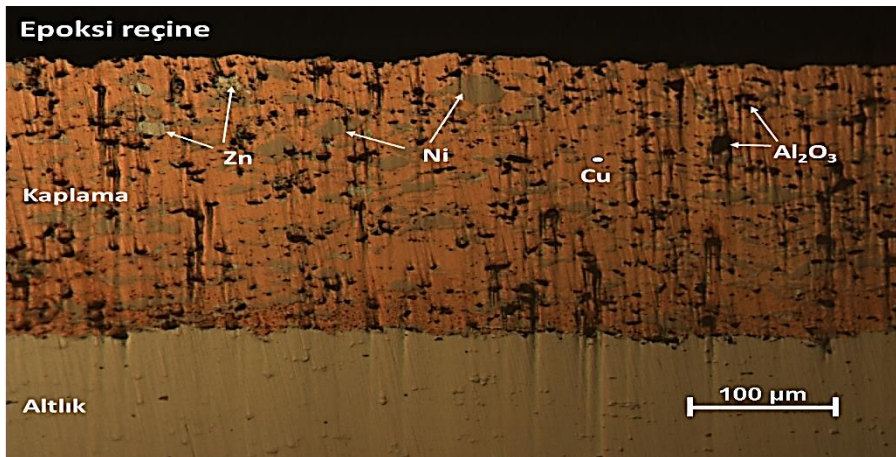
Kaplama Tozları	Toz Bileşenleri (%)			
	Cu	Ni	Zn	Al ₂ O ₃
CA	50	-	-	50
NZA	-	50	10	40
CNZA15	42,5	6	1,7	49,8
CNZA30	37,7	14,7	2,3	45,3
CZA	35	-	25	40

3.2. Cu esaslı MMK kaplamaların karakterizasyonu

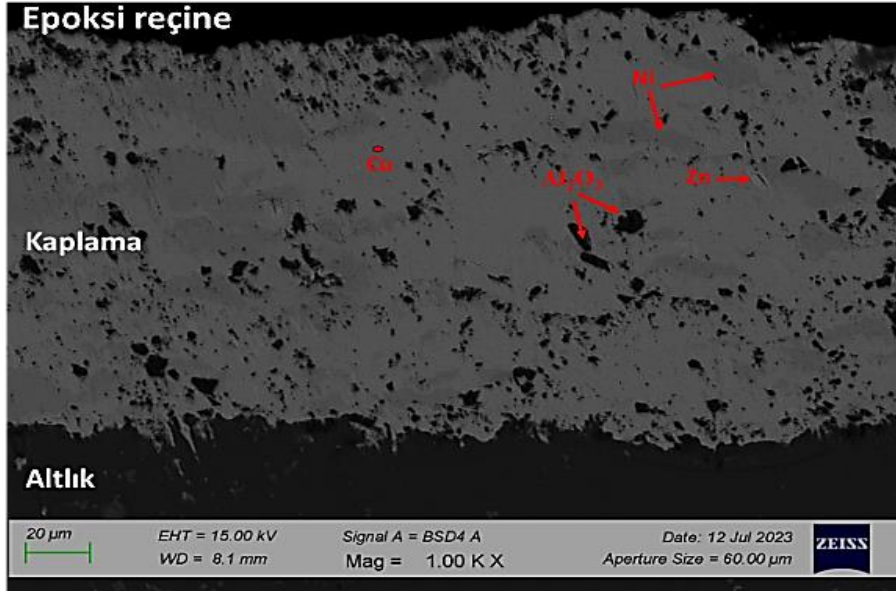
Cu esaslı kaplamaların mikroyapı incelemeleri OM ve SEM analizleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntülerde kaplama tozunda yer alan metal ve seramik

bileşenlere ait mikro yapı oluşumları farklı renkteki bölgelerden yola çıkılarak tespit edilmiştir. Sonuçlar kaplama mikroyapılarında baskın metal matrisin bakır olduğunu ve Al₂O₃ partiküllerinin metal matrisine homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Kaplamalara ait OM görüntülerinde turuncu bölgelerin Cu, siyah bölgelerin Al₂O₃, haki renkli bölgelerin Ni ve açık yeşil bölgelerin Zn olduğu belirlenmiştir. Kaplamalara ait SEM görüntülerinde ise açık gri renkteki bölgelerin Cu, siyah bölgelerin Al₂O₃, koyu gri bölgelerin Ni ve beyaz bölgelerin Zn olduğu tespit edilmiştir. Tüm mikroyapı bileşenlerini içeren CNZA30 20t kaplamasına ait 200x büyütmedeki OM görüntüsü (Şekil 5a) ve 1000x büyütmedeki SEM görüntüsü (Şekil 5b) örnek olarak Şekil 5'te verilmiştir.

Ayrıca karakterize edilen kaplamalar ile ilgili olarak noktasal EDS çalışması yürütülmüş ve mikro yapı incelemelerinde ortaya çıkan farklı renkteki bölgelerin hangi bileşene ait olduğu doğrulanmıştır. Kaplamalar arasında farklı renkteki tüm mikro yapı bileşenlerini içeren CNZA30 20t kaplamasına ait analiz çıktısı örnek olarak Şekil 6'da verilmiştir.



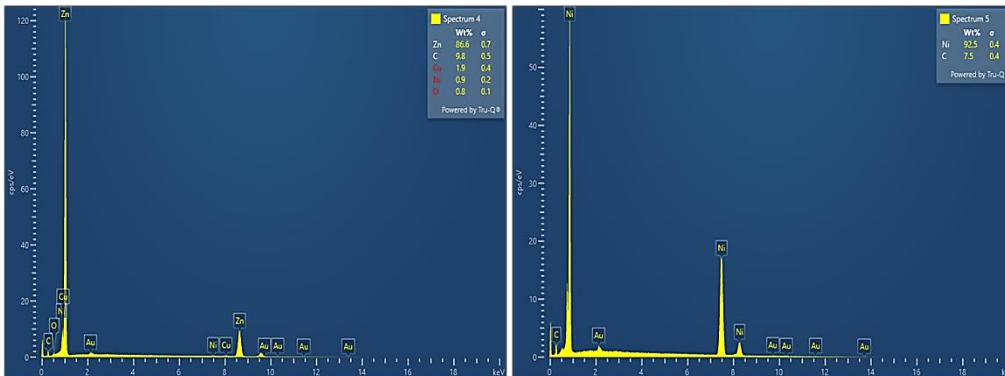
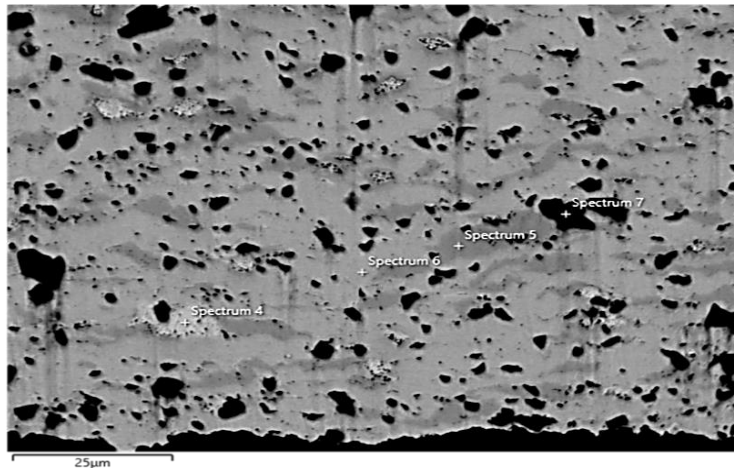
(a)

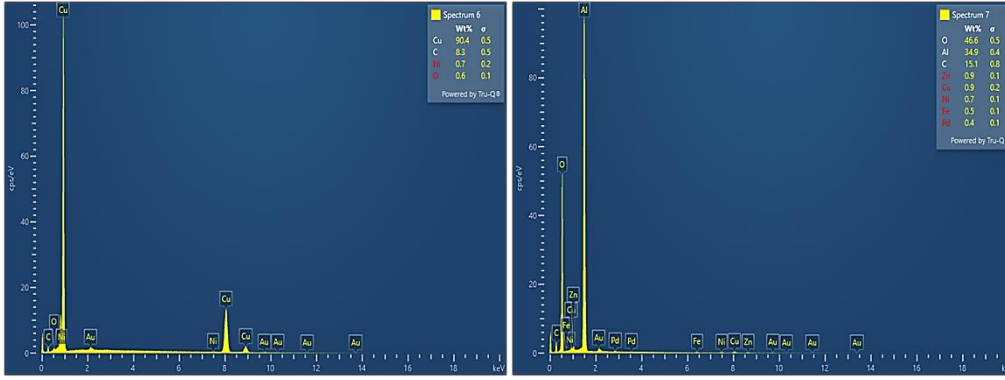


(b)

Şekil 5. CNZA30 20t kaplamasına ait mikroskop görüntüleri: (a) OM ve (b) SEM.

Figure 5. Microscopic images of the CNZA30 20p coating: (a) OM ve (b) SEM.





Şekil 6. CNZA30 20t kaplamasına ait noktasal EDS çıktıları.

Figure 6. Results of point EDS analysis for CNZA30 20p coating .

Kaplama kalınlıkları ile ilgili olarak hem OM hem de SEM incelemelerinde 7 farklı bölgeden ölçüm alınmış, bu ölçümlerin sonuçları maksimum, minimum ve ortalama değerler olacak şekilde Tablo 4'te verilmiştir. Kaplama kalınlıkları değerlendirildiğinde en yüksek kaplama kalınlıklarının CNZA kaplamalarında elde edildiği görülmüştür. Bu durum özellikle CA tozu içerisine ilave edilen NZA tozundaki nikelin kaplama üretimi esnasında nispeten daha düşük sertlik değerine sahip Cu matrisi içerisine gömülerek kaplama kalınlığına pozitif yönde katkı sağlaması ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca püskürtme adım sayısı ile kaplama kalınlığının doğru orantılı olarak değişim gösterdiği bulunmuş, literatürde de benzer bulgulara ulaşılmıştır [41,42].

Tablo 4. Cu esaslı kaplamalara ait kalınlık ölçüm sonuçları.

Table 4. Thickness measurement results for Cu-based coatings.

Kaplama	Kalınlık Ölçümü (µm)		
	Min.	Maks.	Ort.
CA 10t	32	49	38,51
CA 20t	46,5	54,7	50,99
CNZA15 10t	54	76	70,02
CNZA15 20t	86,1	116,9	100,1
CNZA30 10t	79,2	99,9	92,2
CNZA30 20t	273,4	284	277,4
CZA 10t	30,2	49,6	37,44
CZA 20t	79,8	96,8	89,32

Sertlik ölçümleri en az 5 farklı bölgeden alınan ölçümler sonucunda belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri esnasında karşılaşılan en büyük zorluk sertlik izinin isabet ettiği bölgedeki yumuşak metal matris ile sert seramik partikül dağılımındaki farklılaşma olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla ölçüm değerlerinde bölgesel olarak dramatik değişimlerin meydana gelebilmesi mümkün olmuştur. Bu ölçümlere dair minimum, maksimum ve ortalama değerler Tablo 5'te verilmiştir. Buna göre en yüksek sertlik değerleri kaplama bünyesindeki Ni bileşeninin varlığı ile ilişkili olarak CNZA kaplamalarında, en düşük değerler ise CZA kaplamalarında tespit edilmiştir. CNZA30 kaplamaları dışındaki tüm kaplamaların sertlik değerleri, altlık malzemesi olarak seçilen 7075 AA'nın sertlik değerinin altında kalmıştır. Cu esaslı soğuk püskürtme kaplamalarına yönelik literatürde bulunan teorik sertlik değeri incelendiğinde sertlik değerlerinin 110-180

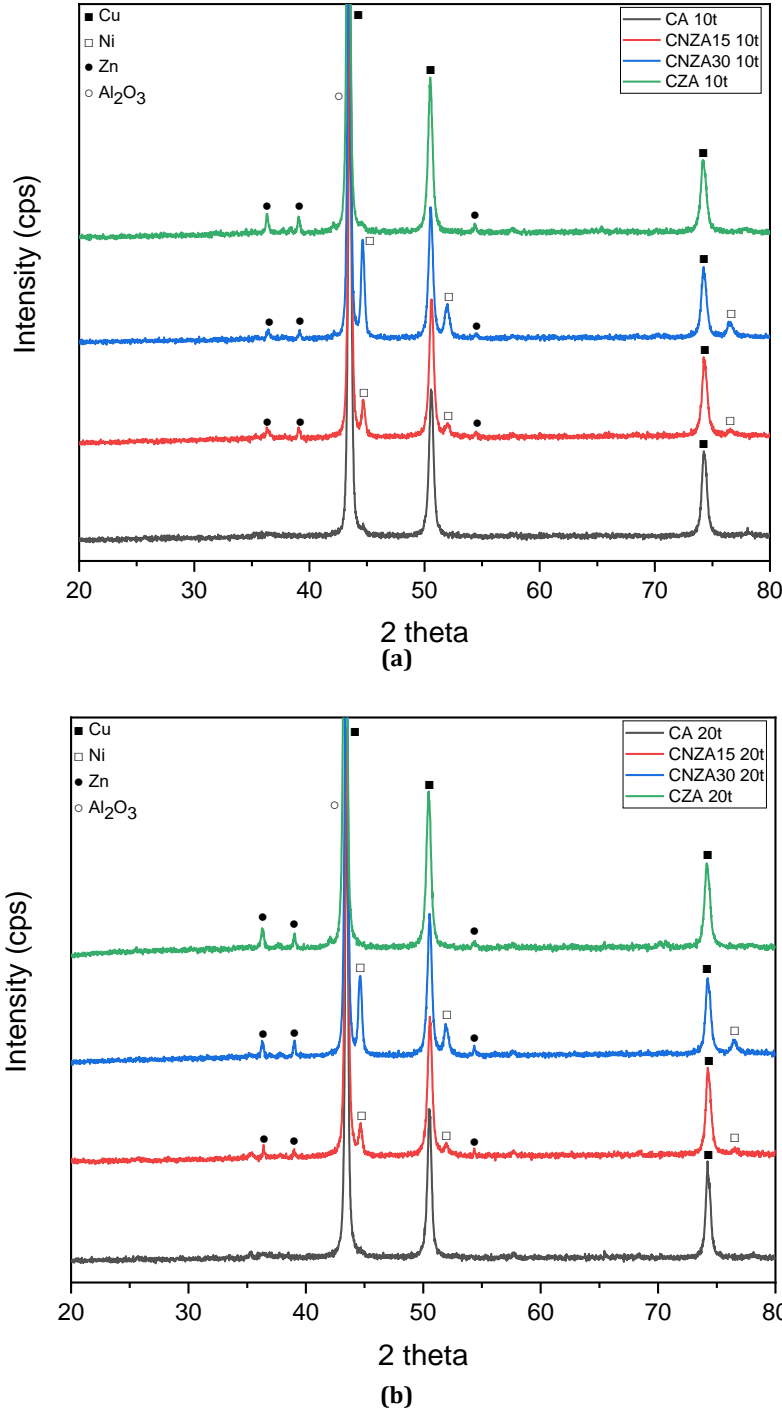
HV arasında değişim gösterdiği bulunmuş, sonuçlar Ni içerikli kaplamaların daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğunu doğrulamıştır [43,44].

Tablo 5. 7075 AA ve Cu esaslı kaplamalara ait Vickers sertlik değerleri.

Table 5. Vickers hardness values for the 7075 AA and Cu-based coatings.

Numune	HV _{0,025}		
	Min.	Maks.	Ort.
7075 AA	179	186	183
CA 10t	141	150	145
CA 20t	146	154	150
CNZA15 10t	145	157	151
CNZA15 20t	144	173	158
CNZA30 10t	165	210	187
CNZA30 20t	166	218	192
CZA 10t	82	92	87
CZA 20t	95	103	99

CA, CNZA15, CNZA30 ve CZA kaplamalarına ait XRD paternleri Şekil 7'de verilmiştir. XRD paternleri püskürtme adım sayısı 10t veya 20t olacak şekilde gruplandırılarak ayrı ayrı sunulmuştur. Elde edilen XRD paternleri incelendiğinde toz malzeme ve aynı tozla üretilen kaplama faz içeriklerinin birbiriyle benzer olduğu, besleme tozlarında bulunan bileşenlerin dışında herhangi bir faza ait pikin bulunmadığı görülmüştür. Dolayısıyla SDGP prosesinin doğası gereği püskürtme işlemi sırasında tozların yüksek sıcaklıklara maruz kalmadığı ve termal etkinin herhangi faz dönüşümüne neden olmadığı sonucu ortaya çıkarılmıştır. Aynı zamanda oksidasyonu veya kimyasal reaksiyonu işaret eden herhangi bir difraksiyon piki tespit edilmemiştir. XRD paternleri tüm kaplamalar için baskın faz içeriğinin Cu ve Al₂O₃ olduğunu ve püskürtme adım sayısının kaplamaların faz içerikleri üzerinde bir etkisinin olmadığını göstermiştir. CNZA15 ve CNZA30 kaplamaları için Ni fazı ayırt edici olmuş ve tespit edilmiştir. İlave olarak piklerin şiddet değerleri göz önünde bulundurulduğunda besleme tozundaki miktarları ile paralel olarak CNZA30 kaplamasında Ni fazı, CZA kaplamasında ise Zn fazı daha yüksek şiddet değerleri ile belirlenmiştir. XRD sonuçları mikroyapı analizlerini ve EDS sonuçlarını doğrulamıştır.



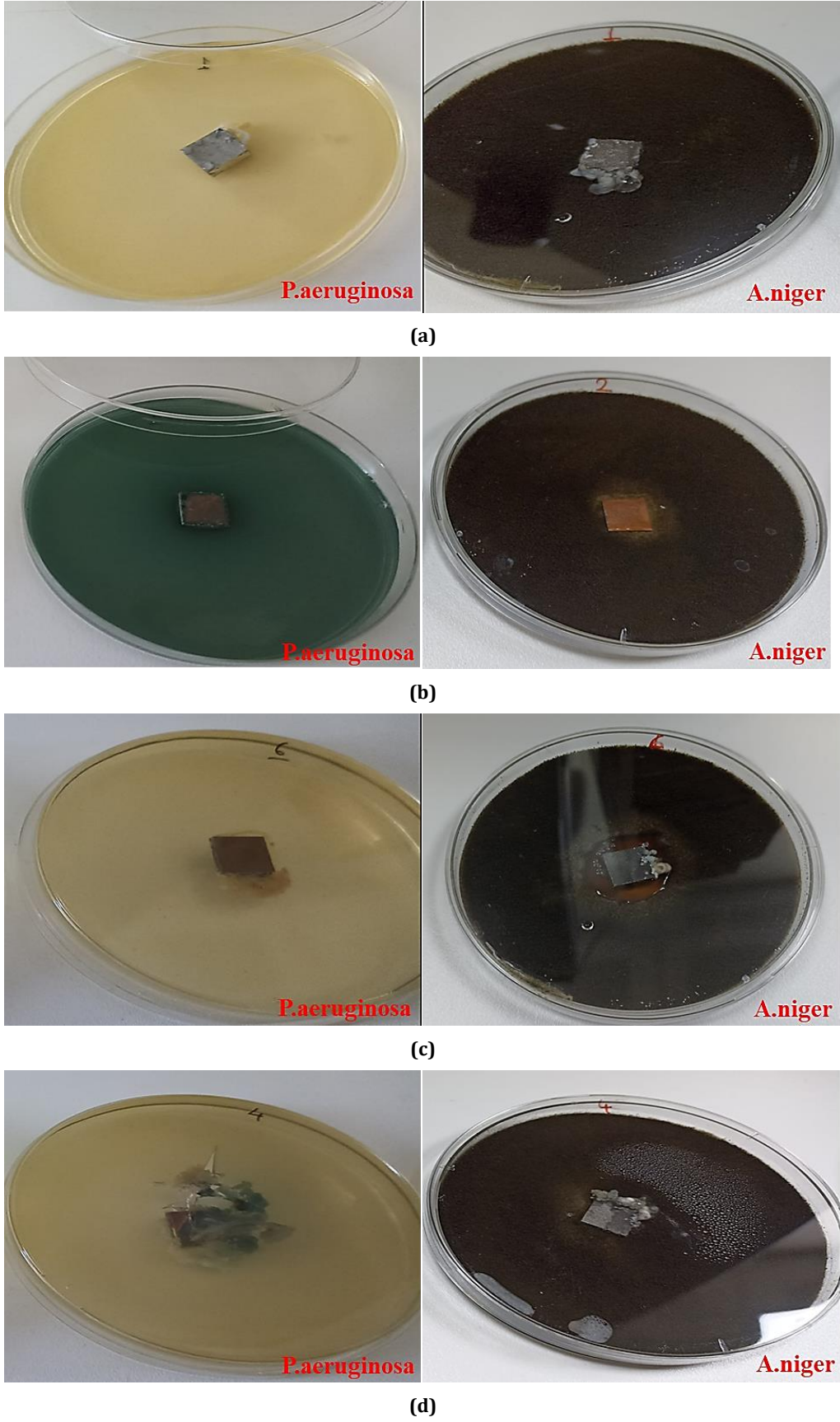
Şekil 7. Cu esaslı kaplamaların XRD paternleri: (a) 10 tur ve (b) 20 tur.

Figure 7. XRD patterns of Cu-based coatings: (a) 10 passes (b) 20 passes.

3.3. Cu esaslı kaplamaların mikrobiyolojik korozyon davranışları

Altlık malzeme 7075 AA, saf Cu plaka, CA, CNZA15, CNZA30 ve CZA numunelerinin Gram-negatif bakteri (*P.aeruginosa*) ve bir küf türü (*A.niger*) içeren petriyelerdeki inkübasyon süresi 4 hafta sonunda tamamlanmıştır. Numuneler petriden çıkarılmadan önce incelendiğinde 7075 AA, saf Cu plaka ve Cu esaslı kaplamaların bu süreç içerisinde farklı davranış sergilediği tespit

edilmiştir. Cu esaslı kaplamalar kendi aralarında değerlendirildiğinde CZA hariç tüm kaplamaların benzer davranışları sergilediği, bununla birlikte CZA kaplaması için farklı oluşumların söz konusu olduğu görülmüştür. Bu bağlamda 7075 AA, saf Cu plaka, CZA ve diğer Cu esaslı kaplamalar (CA-CNZA15-CNZA30) gruplandırılarak inkübasyon süresi sonunda petriyelerin numuneler çıkarılmadan önceki görselleri Şekil 8'de verilmiştir.



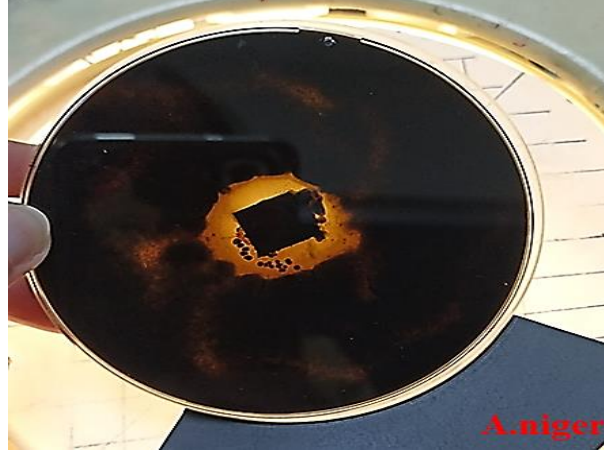
Şekil 8. İnkübasyon süresi sonunda petri görselleri: (a) 7075 AA, (b) Saf Cu plaka, (c) CZA ve (d) Cu esaslı kaplamalar (diğer).

Figure 8. Petri dish images at the end of the incubation period: (a) 7075 AA, (b) Bulk Cu, (c) CZA and (d) Cu-based coatings (others).

İnkübasyon süresi sonrası petri örnekleri incelendiğinde *P.aeruginosa* içeren TSA besiyerindeki saf Cu plaka (Şekil 8-b) ve CZA dışındaki Cu esaslı kaplamalarda (Şekil 8-d) koyu yeşil renkte Bakır (II) Oksit (CuO) oluşumunun meydana geldiği görülmüştür. Özellikle saf Cu plakanın yer aldığı petride besiyeri renginin sarı renkten koyu yeşil renge dönüşüm gösterdiği tespit edilmiştir. CZA dışındaki Cu esaslı kaplamalar için besiyeri renginde bir değişim olmazken, oksit oluşumu numune yüzeyinde başlayıp besiyeri geneline yayılmamıştır. 7075 AA (Şekil 8-a) ve CZA (Şekil 8-c) numuneleri için belirgin bir değişim gözlenmemiş, CZA numunesi Cu içermesine rağmen CuO oluşumuna yönelik bir belirtiyeye rastlanmaması dikkat çekmiştir. *A.niger* içeren MEA besiyerindeki numuneler değerlendirildiğinde saf Cu plaka haricindeki tüm numunelerin

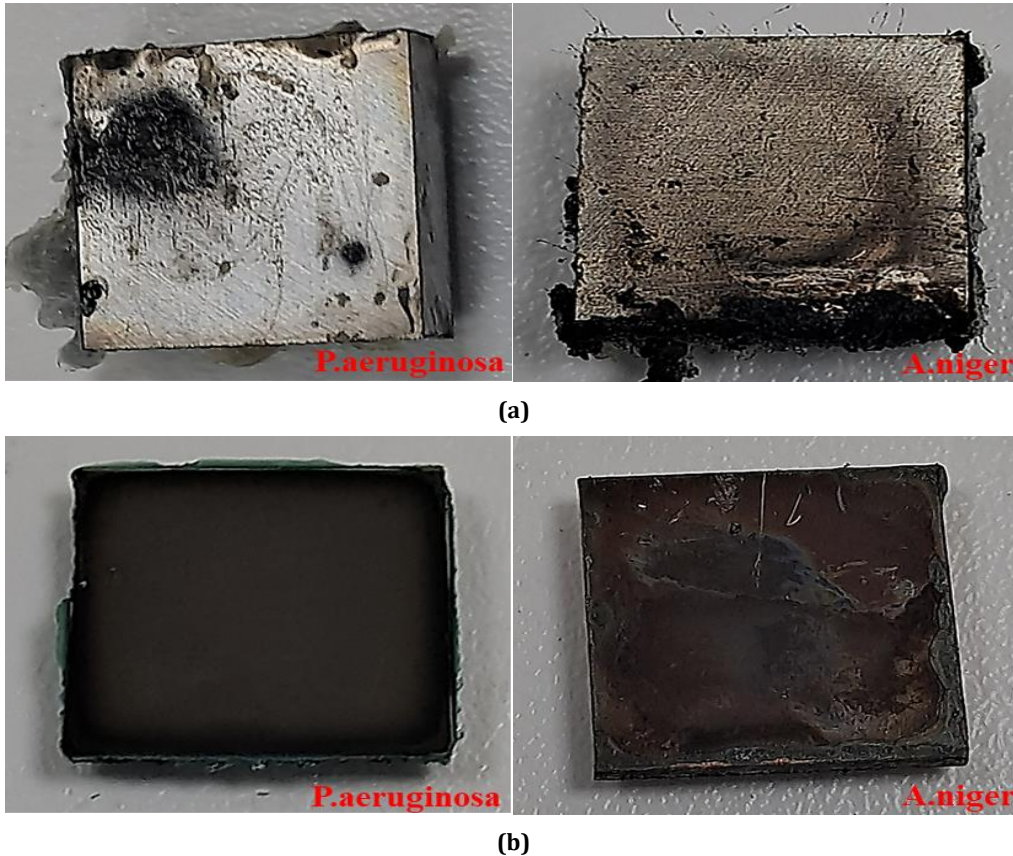
çevresinde yoğun şekilde küf üremesinin meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca saf Cu plaka numunesinde sınırlı düzeyde olmak üzere, saf Cu plaka ve CZA numunelerinde antifungal etki ve inhibisyon zonu tespit edilmiştir. CZA numunesinde tespit edilen ve diğer numunelere kıyasla oldukça dikkat çeken inhibisyon zonunun detaylı görseli Şekil 9'da verilmiş olup, zon çapı 7 mm olarak ölçülmüştür.

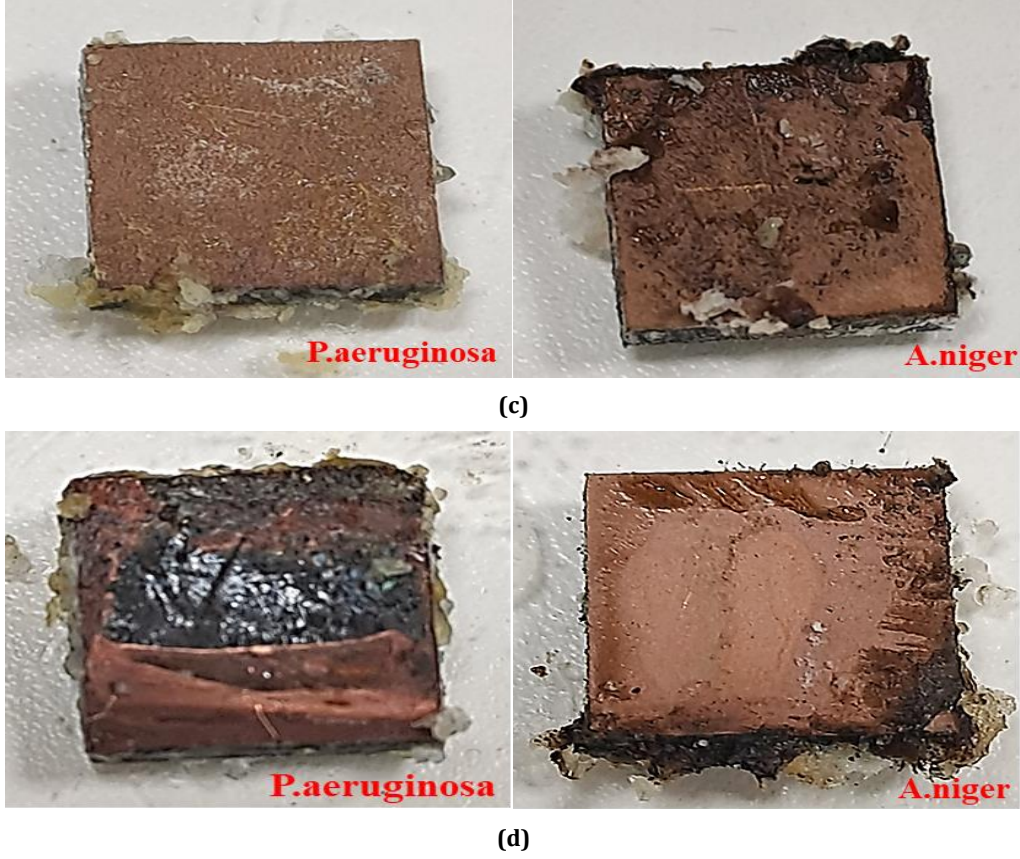
Gözle yapılan ilk muayenenin ardından numuneler mikroorganizma ve besiyeri artıklarından arındırılarak mikrobiyolojik korozyon davranışları incelenmiştir. Petrilerden çıkarılan numunelerin test sonrası görselleri Şekil 10'da verilmiştir



Şekil 9. *A.niger* ortamında CZA numunesi için tespit edilen inhibisyon zonu.

Figure 9. Inhibition zone identified in the *A. niger* medium for the CZA coating.





Şekil 10. Besiyeri ortamından çıkarılıp temizlenmiş numune görselleri: (a) 7075 AA, (b) Saf Cu plaka, (c) CZA ve (d) Cu esaslı kaplamalar (diğer).

Figure 10. Images of specimens removed and cleaned from the growth medium: (a) 7075 AA, (b) Bulk Cu, (c) CZA and (d) Cu-based coatings (others).

P.aeruginosa ve *A.niger* besiyeri ortamından çıkarılan numuneler değerlendirildiğinde numunelerin *P.aeruginosa* inoküle edilmiş besiyeri ortamında, *A.niger* inoküle edilmiş besiyeri ortamına kıyasla mikrobiyolojik korozyondan daha çok etkilendiği görülmüştür. *P.aeruginosa* ortamında CZA dışındaki tüm numunelerde mikrobiyolojik korozyon etkileri tespit edilmiştir. Bu noktada 7075 AA'nın yüzeyinde çukurlar gözlenmiş, saf Cu plakanın oksitlendiği belirlenmiş ve genel korozyon etkilerine rastlanmıştır. CZA dışındaki Cu esaslı kaplamalarda ise galvanik etkileşim ile beraber altlık-kaplama ara yüzeyi korozyona hassas hale gelerek altlık-kaplama bütünlüğü bozulmuş ve kaplamalarda yüzeyden kopmalar meydana gelmiştir. CNZA30 numunesinde kaplama altlıktan tamamen ayrılarak 7075 AA altlık yüzeyi ortaya çıkmıştır. Kaplamalar için *P.aeruginosa* ortamındaki mikrobiyolojik korozyon direnci büyüklüğü CZA > CA > CNZA15 > CNZA30 şeklinde tespit edilmiştir. CA'ya kıyasla bünyesinde Ni bulunan CNZA 15 ve CNZA30 için *P.aeruginosa* ortamında mikrobiyolojik korozyon kaynaklı tahribatın boyutunun üst seviyelere ulaştığı tespit edilmiştir. *A.niger* ortamında ise 7075 AA ve saf Cu plaka numunelerinin yüzeyinde genel korozyon etkileri görülmüştür. Bununla birlikte Cu esaslı kaplamaların tümü için herhangi bir korozyon belirtisine rastlanmamış ve altlık-kaplama ara yüzeyi korozyondan etkilenmeyerek kaplama bütünlüğü korunmuştur. *A.niger* ortamında Cu esaslı kaplamaların saf Cu plaka numunesine göre daha başarılı antifungal etki göstermesi kaplamaların bünyesindeki Al_2O_3 varlığı ile ilişkilendirilmiştir [45].

Kaplamalar arasında sadece CZA'nın hem bakteri hem de fungus besi ortamında herhangi bir mikrobiyolojik korozyon belirtisi göstermeyerek en iyi antibakteriyel ve antifungal etkiyi

sergilemesi kaplama bünyesinde önemli miktarda bulunan Zn ile ilişkilendirilmiştir. Literatürde yer alan bir çalışmada çinko iyonlarının (Zn^{2+}), çeşitli bakteri ve fungus türlerine karşı antimikrobiyal aktivite sergilediği, çinko oksit (ZnO) parçacıklarının kısmi çözünmesinin, sulu süspansiyonda Zn^{2+} iyonlarını serbest bıraktığı ve bunun da ZnO 'nun antimikrobiyal aktivitesine katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır [46]. Soğuk püskürtme ZnO /Titanyum kompozit kaplamanın biyoyumluluğu ve antibakteriyel özelliklerinin incelenmesine yönelik yürütülen bir çalışmada ZnO /Ti kaplamaların *E. coli*'ye karşı önemli antibakteriyel etkiler sağladığı görülmüştür. Ayrıca biyoyumluluk sonuçları, kaplama bileşimindeki ZnO konsantrasyonunun artmasıyla hücre canlılığının azaldığını göstermiştir [38]. Bir başka çalışmada, gümüş, nikel, çinko ve bakır gibi farklı geçiş metalleri ilaveli kaplamaların *Staphylococcus aureus*'a karşı antimikrobiyal özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, soğuk püskürtülmüş numunelerin kontrol çözeltisine karşı öldürücü etkisi değerlendirilmiş ve bu değerlendirme $Ni < Cu < Zn < Ag$ şeklinde sonuçlanmıştır [37]. Diğer bir çalışmada antimikrobiyal uygulamalar için geleneksel ve nanomalzeme bakır soğuk püskürtme yüzeylerindeki korozyonun etkisi araştırılmıştır. Nanomalzeme Cu'nun iyon salınımının ve korozyon hızının artmasının, geleneksel Cu ile karşılaştırıldığında antimikrobiyal etkinliğine doğrudan katkıda bulunduğu anlaşılmıştır [39]. Bu çalışmada kullanılan kaplama tozlarının partikül boyut dağılımları karşılaştırıldığında en düşük ortalama partikül boyutu CZA için tespit edilmiştir. Dolayısıyla küçük tane boyutunun getirdiği artan iyon salınımının CZA'nın sahip olduğu antimikrobiyal etkinliğe katkı sağladığı anlaşılmıştır.

4. Sonuç ve Tartışma

• Kaplama tozları arasında yapılan analizler sonucunda, NZA tozunun en yüksek ortalama partikül boyutuyla (27,28 μm) öne çıktığı, en düşük ortalama partikül boyutuna ise CZA tozunun sahip olduğu belirlenmiştir. SEM analizleri, bakırın dentritik, alüminyumun köşeli, nikelin süngersi ve çinkonun küresel morfolojiye sahip olduğunu göstermiştir. XRD paternleri kaplama tozları ile ilgili olarak bileşime uygun eşleşme göstermiş ve beklenenin haricinde bir faz tespit edilmemiştir.

• OM ve SEM analizleri ile kaplama mikro yapılarında baskın metal matrisin bakır olduğu ve Al_2O_3 partiküllerinin metal matrisine homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. XRD paternleri, mikro yapı analizleri ve EDS sonuçları ile uyumlu olarak toz malzeme ve aynı tozla üretilen kaplama faz içeriklerinin birbiriyle benzer olduğunu göstermiştir. En yüksek kaplama kalınlığı (277,4 μm) ve sertlik değeri (192 $\text{HV}_{0,025}$) CNZA30 20t kaplamalarında, en düşük kaplama kalınlığı (37,44 μm) ve sertlik değeri (87 $\text{HV}_{0,025}$) CZA 10t kaplamalarında tespit edilmiştir. Ayrıca püskürtme adım sayısı kaplama kalınlığı üzerinde pozitif etki yaratmış, sertlik değerlerinde ise anlamlı bir değişime sebep olmamıştır.

• Mikrobiyolojik korozyon test sonuçlarına göre, *Pseudomonas aeruginosa* besiyeri ortamında *Aspergillus niger* besiyeri ortamına kıyasla daha yüksek mikrobiyolojik korozyon etkisi tespit edilmiştir. *P. aeruginosa* besiyerinde saf Cu ve CZA dışındaki Cu esaslı kaplamalarda koyu yeşil renkte Bakır (II) Oksit (CuO) oluşumu gözlemlenmiş, özellikle saf Cu plaka içeren petride besiyeri renginin sarıdan koyu yeşile dönüşüm gösterdiği belirlenmiştir. *A.niger* besiyerindeki numunelerde saf Cu plaka haricindeki tüm numunelerin çevresinde yoğun şekilde küf gelişimi görülmüş, CZA numunelerinde antifungal etkiye bağlı olarak 7 mm'lik inhibisyon zonu tespit edilmiştir.

• *P.aeruginosa* ortamında CZA dışındaki tüm numunelerde mikrobiyolojik korozyon etkileri saptanmış, 7075 AA'nın yüzeyinde çukurlar ve saf Cu plakanın oksitlendiği tespit edilmiştir. CZA dışındaki Cu esaslı kaplamalarda galvanik etkileşim ile birlikte altlık-kaplama ara yüzeyi korozyona hassas hale gelerek altlık-kaplama bütünlüğünde bozulmalar ve kaplamalarda kopmalar gözlemlenmiştir. Literatürde yer alan $\text{Ni} < \text{Cu} < \text{Zn}$ şeklindeki antibakteriyel aktivite büyüklüğü, kaplamaların *P.aeruginosa* ortamında sergilemiş olduğu mikrobiyolojik korozyon direnci büyüklüğü ile ($\text{CZA} > \text{CA} > \text{CNZA15} > \text{CNZA30}$) doğrulanmıştır.

• *A.niger* ortamında ise 7075 AA ve saf Cu plaka numunelerinin yüzeyinde genel korozyon etkileri gözlenmiş, ancak Cu esaslı kaplamalarda herhangi bir korozyon belirtisine rastlanmamıştır. Kaplamalar arasında sadece CZA'nın hem bakteri hem de fungus besisi ortamında mikrobiyolojik korozyon belirtisi göstermeyerek en iyi antibakteriyel ve antifungal etkiyi sergilemesi kaplama içinde önemli miktarda bulunan Zn ile ilişkilendirilmiştir.

Kaynakça

[1] Cagan, S. C., Venkatesh, B., & Buldum, B. B. 2020. Investigation of surface roughness and chip morphology of aluminum alloy in dry and minimum quantity lubrication machining. *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1122-1126. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.547

[2] Rambabu, P., Prasad, N. E., Kutumbarao, V. V., & Wanhill, R. J. H. 2017. Aluminium Alloys for Aerospace Applications. In *Advances in Metallic Alloys* (pp. 29–52). Springer. DOI: 10.1007/978-981-10-2134-3_2

[3] Zhou, B., Liu, B., & Zhang, S. 2021. The Advancement of 7XXX Series Aluminum Alloys for Aircraft Structures: A Review. *Metals*, 11(5), 718, 1-29. DOI:10.3390/met11050718

[4] Venugopal, A., Panda, R. P., Manwatkar, S., Sreekumar, K., Ramakrishna, L., & Sundararajan, G. 2012. Effect of micro arc oxidation treatment on localized corrosion behaviour of AA7075 aluminum alloy in 3.5% NaCl

solution. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, 700-710. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61234-X

[5] Chateaneuf, A., Cochetex, F., Deffarges, F., & Sourget, F. 2011. Reliability analysis of screwed connections in high-speed trains, considering fatigue, corrosion, and imperfect maintenance operations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 225, 293-306. DOI: 10.1177/1748006x11402738

[6] Shi, T., Liang, J., Li, X., Zhang, C., & Yang, H. 2022. Improving the Corrosion Resistance of Aluminum Alloy by Creating a Superhydrophobic Surface Structure through a Two-Step Process of Etching Followed by Polymer Modification. *Polymers*, 14, 4509. DOI: 10.3390/polym14214509

[7] Nelson, V.V., Maria, O.T., Mamiè, S.V., Maritza, P.C. 2017. Microbiologically influenced corrosion in aluminium alloys 7075 and 2024, in *Aluminium Alloys-Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications*. IntechOpen, 12, 225-242. DOI: 10.5772/intechopen.70735

[8] Vaughn-Thomas, D. M. 2011. Microbial Influenced Corrosion: Role of Bacterial Attachment and Biofilm. *Honors Project 4200:497*, 1-21.

[9] Rawat, J., Khandelwal, A., Sharma, N., & Tyagi, S. 2016. Effect of Sulphate Reducing Bacterial-Biofilm Isolated from Refinery Cooling Water System and Sonication on Corrosion of Carbon Steel. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(1), 362-370.

[10] Dursun, T., & Soutis, C. 2014. Review: Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design*, 56, 862-871. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.002

[11] Smith, R. N. 1991. Developments in fuel microbiology. *Biodeterioration and Biodegradation*, 8, 112-124.

[12] Ayllon, E. S., & Rosales, B. M. 1988. Corrosion of AA7075 Aluminium Alloy in Media Contaminated with *Cladosporium resinae*. *Corrosion Science*, 44(9), 638-643. DOI: 10.5006/1.3584977

[13] Muthukumar, N., Rajasekar, A., Ponmarriappan, S., Mohanan, S., Maruthamuthu, S., Muralidharan, S., Subramanian, P., Palaniswamy, N., & Raghavan, M. 2003. Microbiologically Influenced Corrosion in Petroleum Product Pipelines—A Review. *Indian Journal of Experimental Biology*, 41(11), 1012-1022.

[14] Dexter, S. C. 2003. Microbiologically influenced corrosion. In *Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*, ASM Handbook (Vol. 13, p. 398). ASM International.

[15] da Silva Savonov, G., Camarinha, M. G. G., Rocha, L. O., Barboza, M. J. R., Martins, G. V., Reis, D. A. P. 2019. Study of the influence of the RRA thermal treatment and plasma nitriding on corrosion behavior of 7075-T6 aluminum alloy. *Surface & Coatings Technology*, 374, 736-744. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.095

[16] Abdel-Gawad, S. A., Sadik, M. A., Shoeib, M. A. 2019. Preparation and properties of a novel nano Ni-B-Sn by electroless deposition on 7075-T6 aluminum alloy for aerospace application. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 1284-1292. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.245

[17] Xu, L., Wang, R., Gen, M., Lu, L., & Han, G. 2019. Preparation and properties of graphene/nickel composite coating based on textured surface of aluminum alloy. *Materials*, 12. DOI: 10.3390/ma12193240

[18] Ding, Z. 2019. Mechanistic study of thin film sulfuric acid anodizing rate difference between Al2024 T3 and Al6061 T6. *Surface & Coatings Technology*, 357, 280-288. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.09.083

[19] Suzuki, R. O., Natsui, S., Nishinaga, O., Nakajima, D., & Kikuchi, T. 2015. Porous aluminum oxide formed by anodizing in various electrolyte species. *Current Nanoscience*, 11. DOI: 10.2174/1573413711999150608144742

[20] Bashir, M. I., Shafiq, M., Naeem, M., Zaka-ul-Islam, M., Dfaz-Guillén, J. C., Lopez-Badillo, C. M., & Zakaullah, M. 2017. Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding. *Surface & Coatings Technology*, 327, 59-65. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.036

[21] Wu, L. K., Liu, L., Li, J., Hu, J. M., Zhang, J. Q., & Cao, C. N. 2010. Electrodeposition of cerium (III)-modified bis-[triethoxysilylpropyl]tetra-sulphide films on AA2024-T3 (aluminum alloy) for corrosion protection. *Surface & Coatings Technology*, 204, 3920-3926. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.027

[22] Diggle, J. W., Downie, T. C., & Goulding, C. W. 1969. Anodic oxide films on aluminum. *Chemical Reviews*, 3, 365-405.

[23] Masuda, H., & Fukuda, K. 1995. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *Science*, 268, 1466-1468.

[24] Hwang, S., Jeong, S., Hwang, H., Lee, O., & Lee, K. 2002. Fabrication of highly ordered pore array in anodic aluminum oxide. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 19, 467-473.

[25] Naimi, A., Yousfi, H., & Trari, M. 2012. Microstructure and corrosion resistance of molybdenum and aluminum coatings thermally sprayed on 7075-T6 aluminum alloy. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 48(5), 557-562. DOI: 10.1134/S2070205112050061

- [26] Li, Y.-X., Zhang, P.-F., Bai, P.-K., Zhao, Z.-Y., & Liu, B. 2018. Analysis of geometrical characteristics and properties of laser cladding 85 wt.% Ti + 15 wt.% TiBCN powder on 7075 aluminum alloy substrate. *Materials*, 11(9), 1551-1561. DOI: 10.3390/ma11091551
- [27] Da Silva, M. D., Partes, K., Seefeld, T., & Vollertsen, F. 2012. Comparison of coaxial and off-axis nozzle configurations in one-step process laser cladding on aluminum substrate. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2514-2519. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.011
- [28] Birbilis, N., & Hinton, B. 2011. Corrosion and corrosion protection of aluminium. In *Fundamentals of Aluminium Metallurgy* (pp. 574-604).
- [29] Alkhimov, A. P., Kosarev, V. F., & Papyrin, A. N. 1990. Method of cold gas-dynamic deposition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 315, 1062-1065 (Translated by American Institute of Physics, 1991).
- [30] Papyrin, A., Kosarev, V. F., Klinkov, S., Alkhimov, A., & Vasily, F. 2007. *Cold Spray Technology* (1st ed.). Elsevier: Oxford, UK.
- [31] Villafuerte, J. 2005. Cold Spray: A New Technology. *Welding Journal*, 84(5), 25-29.
- [32] Ghosh, M., Roy, A., Ghosh, A., Kumar, H., & Saha, G. 2020. Antibacterial and antimicrobial coatings on metal substrates by cold spray technique: Present and future perspectives. In *Green Approaches in Medicinal Chemistry for Sustainable Drug Design* (pp. 15-45). Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- [33] Champagne, V. K., & Helfritsch, D. J. 2013. A demonstration of the antimicrobial effectiveness of various copper surfaces. *Journal of Biological Engineering*, 7, 8.
- [34] Jing, H., Yu, Z., & Li, L. 2007. Antibacterial properties and corrosion resistance of Cu and Ag/Cu porous materials. *Wiley InterScience*, 33-37. DOI: 10.1002/jbm.a.31688
- [35] Wrona, A., Bilewska, K., Lis, M., Kamińska, M., Olszewski, T., Pajzderski, P., Więclaw, G., Jaśkiewicz, M., Kamysz, W. 2017. Antimicrobial properties of protective coatings produced by plasma spraying technique. *Surface & Coatings Technology*, 318, 332-340. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.101
- [36] Sanpo, N., Saraswati, T., Lu, T. M., & Cheang, P. 2008. Anti-bacterial property of cold sprayed ZnOAl coating. In *2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics* (Vol. 1, pp. 488-491). DOI: 10.1109/BMEI.2008.291
- [37] Sanpo, N., & Tharajak, J. 2017. Antimicrobial property of cold-sprayed transition metals-substituted hydroxyapatite/PEEK coating. *Applied Mechanics and Materials*, 866, 77-80. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.866.77
- [38] Sanpo, N., Hailan, C., Loke, K., Keng, K. P., Cheang, P., Berndt, C. C., Khor, K. A. 2010. Biocompatibility and antibacterial property of cold sprayed ZnO/titanium composite coating. In A. Mendez-Vilas (Ed.), *Science and Technology against Microbial Pathogens: Research, Development and Evaluation* (pp. 140-144). *Proceedings of the International Conference on Antimicrobial Research*, World Scientific. DOI: 10.1142/9789814354868_0027
- [39] Sundberg, K., Wang, Y., Mishra, B., Carl, A. D., Grimm, R. L., Te, A., Lozeau, L., Sousa, B. C., Sisson, R. D., & Cote, D. L. 2019. The Effect of Corrosion on Conventional and Nanomaterial Copper Cold Spray Surfaces for Antimicrobial Applications. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 22. DOI: 10.26717/BJSTR.2019.22.003768
- [40] Graef, H. W. 2003. *An Analysis of Microbial Contamination in Military Aviation Fuel Systems* (Doctoral dissertation). Air University.
- [41] Moridi, A., Gangaraj, S. M. H., Vezzu, S., & Guagliano, M. 2014. Number of Passes and Thickness Effect on Mechanical Characteristics of Cold Spray Coating. *Procedia Engineering*, 74, 449-459. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.06.296
- [42] Xiong, Y., Zhuang, W., & Zhang, M. 2015. Effect of the thickness of cold-sprayed aluminium alloy coating on the adhesive bond strength with an aluminium alloy substrate. *Surface & Coatings Technology*, 270, 259-265. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.02.048
- [43] Chen, H., Liu, C., Chu, X., Zhang, T., & Zheng, J. 2022. Corrosion Behavior and Microstructure of Cu-Based Composite Coatings Deposited by Cold Spraying. *Metals*, 12, 955. DOI: 10.3390/met12060955
- [44] Zhang, L., Yang, S., Lv, X., & Jie, X. 2019. Wear and corrosion resistance of cold-sprayed Cu-Based composite coatings on magnesium substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(6), 1212-1224. DOI: 10.1007/s11666-019-00887-9
- [45] Gudkov, S. V., Burmistrov, D. E., Smirnova, V. V., Semenova, A. A., & Lisitsyn, A. B. 2022. A Mini Review of Antibacterial Properties of Al₂O₃ Nanoparticles. *Nanomaterials*, 12, 2635. DOI: 10.3390/nano12152635
- [46] Pasquet, J., Chevalier, Y., Pelletier, J., Couval, E., Bouvier, D., & Bolzinger, M. A. 2014. The contribution of zinc ions to the antimicrobial activity of zinc oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 457, 263-274. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2014.05.057



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Homojen Toprak Dolgu Barajın Suyun Üstten Aşması ve Borulanma Nedeniyle Yıkılması Üzerine Deneysel Çalışma

Experimental Study on the Homogeneous Earth-fill Dam Break due to Overtopping and Piping

Ebru Taşkaya¹, Zehra Büyüker^{2*}, Adile Nur Solmaz³, Onurhan Karakaya⁴, Gökçen Bombar⁵, Gökmen Tayfur⁶

^{1,2,4,5} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

³ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

⁶ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: zehrabuyuker@ikcu.edu.tr

Öz

Toprak dolgu baraj yıkılmalarının çoğu üstten aşma ve borulanmadan kaynaklanmakta ve ciddi can ve mal kayıplarıyla sonuçlanabilmektedir. Bu sebeple, baraj yıkılmasıyla oluşan taşkın ilerleyişinin incelenmesi ve riskli alanların tespiti, mansap bölgesinde oluşabilecek zararların önceden belirlenmesi ve önlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, homojen toprak dolgu barajların üstten aşma ve borulanma sebebiyle yıkılması sonucu oluşan taşkın ilerlemesi ve baraj gövdesinden taşınacak sedimentin taşkın dalgası ile mansaptaki hareketi deneysel olarak incelenmiştir. Baraj gövdesi, medyan tane çapı 0,441 mm olan sediment kullanılarak 30 cm yüksekliğinde, 2 m genişliğinde inşa edilmiştir. Baraj gövdesi, standart bir teknikle sıkıştırılmış her biri 10 cm yüksekliğe sahip üç kattan meydana gelmektedir. Deneyler 2 farklı noktadaki kamera ile kayıt altına alınmıştır. Deney sonunda limnometre ile ölçülen sediment kalınlıkları verileri kullanılarak batimetri grafikleri elde edilmiştir. Borulanma nedeniyle barajın yıkılması, baraj rezervuarındaki suyun baraj gövdesindeki sedimenti mansap bölgesine taşıması ve kret genişliğinin zamanla azalmasından sonra başladığı için suyun üstten aşması durumundakine göre daha uzun sürmüştür. Taşkın dalgası, üstten aşma deneyinde baraj gövdesinin orta kısmını mansap bölgesine taşımıştır. Borulanma deneyinde ise baraj mansap bölgesindeki erozyonun zamanla genişlemesi ile rezervuardaki suyun sağ sahile 60 cm mesafedeki en zayıf kesitten barajı yıkmaya başlaması, baraj gövdesinin sağ sahile daha yakın bölgesinin mansap bölgesine taşınmasıyla sonuçlanmıştır. Deney sonuçları taşkın dalgası ekseninde yayılan sedimentin kalınlığının daha az olduğunu göstermiştir. Borulanma deneyinde sızma-erozyon boyunca baraj gövdesinden taşınan sediment, taşkın dalgasının etkisini ve yayılımını azaltmıştır. Bu azalma, borulanma deneyinde baraj mansabına yayılan sedimentin kalınlığını arttırmış, üstten aşma deneyinde daha uzun ve daha geniş sediment yayılımıyla sonuçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toprak Dolgu Baraj Yıkılması, Borulanma, Üstten Aşma, Dolgu Malzemesi Yayılımı

Abstract

Most earth-fill dam failures are caused by overtopping and piping and which can result in serious losses of life and property. Therefore, investigating the progress of the flood caused by the dam's break and detection of risky areas is of importance in terms of predetermining and preventing the damages that may occur in the downstream region. In this study, the progression of the flood caused by the homogeneous earth-fill dam break due to overtopping and piping and the movement of the sediment to the downstream by the flood wave were experimentally investigated. The dam body was constructed 30 cm high and 2 m wide by using uniform sediment with a median grain diameter of 0.441 mm. The dam bodies consist of three layers with a height of 10 cm, which were compacted with a standard technique. Experiments were recorded with cameras at 2 different points. At the end of the experiment, bathymetry graphs were obtained by using the sediment thickness data measured with a limnimeter. The dam failure due to piping started after the water in water reservoir passed through the gaps in the dam body, the sediment in the dam body was transported to the downstream region, and the crest width decreased over time, so it took longer than overtopping case. With the flood wave, the middle part of the dam body in the overtopping experiment were moved to the downstream region. In the piping experiment, as the erosion in the downstream area of the dam expanded over time, the water in the reservoir started to failure the dam body from the weakest section 60 cm away from the right shore, resulting in the part of the dam body close to the right shore being moved to the downstream area. Experimental results showed that the depth of the propagated sediment is less in the flood wave axis. In the piping experiment, sediment moved from the dam body during infiltration and erosion reduced the effect and propagation of the flood wave. This decrease increased the thickness of the propagated sediment at the downstream of the dam in the piping experiment and resulted in a longer and wider sediment propagate in the overtopping experiment.

Keywords: Earth-fill Dam Failure, Piping, Overtopping, Filling Material Propagation

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A dam is a structure that is constructed as a barrier across a valley or natural depression to stop or restrict the flow of water or underground streams and to create a water storage which is called reservoir. Such reservoirs are required for three main purposes as provision of a dependable water supply for domestic and/or irrigation use, flood mitigation and generation of electric power.

Most of the dams built to date are earth fill dams [1]. The failure mechanism of earth fill dams may be related to one or more of the factors such as unexpectedly large inflow, insufficient foundation, different settlement, landslides, earthquakes, inadequate project design and construction, poor construction materials use, and faulty operations. Most failures in earth-fill dams are caused by piping from internal erosion and overtopping.

As a result of dam failure, a huge amount of water accumulated in the dam reservoir exceeds the dam body and this uncontrolled water moves to the downstream region with the dam body sediment which causes devastation. For this reason, it is an important issue to determine the flood movement in order to obtain the possible risks that may occur in the settlement areas which is located in the downstream region of the dam.

Models related to the hydrodynamics of the flood wave resulting from the failure of dams are available in the literature, but there are fewer studies on the movement of the sediment to the downstream by the flood wave during dam failures [13-15].

In this study, the failure of earth-fill dams due to overtopping and piping were examined experimentally and the progression of the sediment moving towards the downstream of the dam with the flood wave resulting from both types of failure was examined.

Materials and Methods

Homogeneous earth-fill dam break was carried out with two different scenarios, namely, overtopping and piping.

The experiments were performed in a reinforced concrete channel with 18 m in long, 2 m in wide and 0.88 m in deep, located in the hydraulic laboratory of Izmir Katip Çelebi University.

The homogeneous earth-fill dam bodies were constructed 30 cm high and 2 m wide by using uniform sediment with a median grain diameter of 0.441 mm. The dam bodies consist of three layers with a height of 10 cm, which were compacted with a standard technique. At the beginning of the experiment process, the dam was covered with a nylon cover until the level of the water coming from the channel stabilized. After the water reached the desired level, the cover on the dam was removed (Fig. 2).

Experiments were recorded with cameras at 2 different points. At the end of the experiment, bathymetry graphs were obtained by using the sediment thickness data measured with a limnimeter.

Results and Discussion

The dam failure due to piping started after the water in water

reservoir passed through the gaps in the dam body, the sediment in the dam body was transported to the downstream region, and the crest width decreased over time, so it took longer than overtopping case (Table 1). Due to piping and overtopping, the dam reached its final state 620 and 920 seconds after failure, respectively.

In the overtopping experiment, as the breach widened in the middle of the dam, the flood wave passed from there to the downstream region and it was observed that the sediment spread symmetrically to the downstream of the dam. In the piping experiment, as the erosion in the downstream area of the dam expanded over time, the water in the reservoir started to failure the dam body from the weakest section 60 cm away from the right shore, resulting in the part of the dam body close to the right shore being moved to the downstream area (Fig. 12).

Experimental results showed that the depth of the propagated sediment is less in the flood wave axis (Fig. 12).

In the piping experiment, sediment moved from the dam body during infiltration and erosion reduced the effect and propagation of the flood wave. This decrease increased the thickness of the propagated sediment at the downstream of the dam in the piping experiment and resulted in a longer and wider sediment propagate in the overtopping experiment. The propagated sediment was 1.85 m wide and 4.8 m long in the overtopping experiment, while in the piping experiment the body was transported across the dam width due to initial erosion and the width of the dispersed sediment was 2 m, the length was 1.7 m on the bank, 6 m in total (Table 1).

The breach volumes of dam bodies were 189461 and 72447 cm³ after failure, in piping and overtopping experiments, respectively. In the piping experiment, due to the erosion before dam failed, although the breach volume was smaller than the overtopping, the volume of sediment carried and spread from the dam body was higher (Table 1).

Conclusion

Investigating the progress of the flood wave caused by the dam's break and detection of risky areas is of great importance in terms of predetermining and preventing the damages that may occur in the residential areas in the downstream region.

In the piping experiment, sediment moved from the dam body during infiltration and erosion reduced the effect and propagation of the flood wave. This decrease increased the thickness of the propagated sediment at the downstream of the dam in the piping experiment and resulted in a longer and wider sediment propagate in the overtopping experiment.

While the middle part of the dam body was moved to the downstream region in the overtopping experiment, in the piping experiment, due to the internal dynamics that occurred during the 27-hour seepage-erosion period, dam failure started from the section 40 cm from the middle of the dam body and the area close to the right bank was moved.

1. Giriş

İnsanlık tarihi boyunca suya olan ihtiyaçla beraber suyun sel gibi afetlere neden olması, suyun kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla birçok yapı inşa edilmiştir ve barajlar da

bu yapılardan biridir. Barajlar, gövdenin statik tasarımına ve gövde şekline göre ağırlık barajları, kemer barajlar, payanda barajlar, tersip bendi barajlar ve kompozit barajlar olarak sınıflandırılabilir. Dolgu barajlar ise dolguda kullanılan malzeme türüne göre toprak dolgu barajlar (homojen, zonlu), kaya dolgu

barajlar ve önyüzü güçlendirilmiş dolgu barajlar olarak sınıflandırılabilir [1]. Bugüne kadar yapılan barajların çoğu toprak dolgu barajlardır. Türkiye’de barajların %71’i toprak dolgu, %20’si kaya dolgu tipindeki barajlardır [2]. Toprak dolgu barajlar için taşkınlar sonucu, zayıf temel, toprak kayması, deprem, yetersiz tasarım ve yapı, kötü inşaat malzemesi kullanımı ve hatalı işçilik başlıca yıkılma sebepleri arasında gösterilebilir. Yıkılmanın türü, yıkılma nedenine ve barajın özelliklerine göre değişmektedir. Toprak dolgu barajların en yaygın yıkılma şekli üstten aşma ve borulanmadır. Baraj yıkılmalarının %38’ini dolusavak kapasitesinin yetersizliğinden dolayı üstten aşma, %33’ünü borulanma ve %23’ünü ise yukarıda bahsedilen diğer sebepler oluşturmaktadır [3]. 1975 yılında Çin’de Banqiao Barajı’nın fazla yağışlardan dolayı yıkılması üstten aşma ile yıkılan barajlara örnek olarak verilebilir. Barajın yıkılması, yaklaşık on milyon nüfusu etkilemiş, yaklaşık 30 şehir ve ilçe olmak üzere toplamda 12,000 km² alan sular altında kalmıştır ve tahmini ölü sayısı 26,000 ile 240,000 arasında değişmektedir [4]. Aynı zamanda 1976 yılında ABD’de dolgu barajı olan Teton Barajı, borulanma sebebi ile yıkılan toprak dolgu barajlara örnek olarak verilebilir. 93 m yüksekliğindeki Teton Barajı’nın yıkılması sonucunda on bir kişi ve 13,000 sığır ölmüştür [5]. İki barajın da yıkılması çok sayıda can kaybı ve büyük maddi kayıplar ile sonuçlanmıştır.

Borulanma, suyun baraj gövdesindeki malzemeyi harekete geçirmesi ile oluşur ve dolgu içinde veya temel zemininde görülmeyen su kanalları haline gelir. Bu kanallar kısa sürede büyüyerek gövdede yarılmaya, göçmeye neden olur [6]. [7] toprak dolgu barajların yıkılma sebeplerini incelemiş, özellikle borulanma sebebi ile baraj yıkılması üzerine istatistiksel analizlerinin sonuçlarını açıklamışlardır. [8] dolgu barajlar ve temellerinde iç erozyon ve borulanmanın ilerlemesi ve yıkılmaya sebep olan bir borulanma gelişmesi için zamana bağlı tahmini için bir yöntem sunmuştur. Bu çalışmanın sonucunda barajlarda borulanmadan kaynaklı yıkılma süresinin kısa olması sebebiyle borulanmalardan kaynaklı sızıntıların tespit edilmesi için barajların sürekli olarak izlenmesinin gerekliliğini vurgulamışlardır. [9] toprak dolgu barajda borulanma üzerine yapılan çalışmaları derlemiştir. [10] bir taşkın dalgası nedeniyle baraj yıkılmalarını incelemiş ve çalışmalarında mansap yönündeki morfolojik gelişimi gözlemlemeye çalışmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, baraj yıkılmasının başlangıcında sediment erozyonu nedeniyle barajın mansabında bir hidrolik sıçramanın meydana geldiğini ve ilerleyen sürelerde kaybolduğunu gözlemlemişlerdir. [11] benzer bir şekilde taşkın dalgası nedeniyle baraj yıkılması sonucu oluşan yatak formlarını araştırmışlardır. [12] Ürkmez Barajı’nın üç boyutlu çarpık modelini kullanarak barajın yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasını incelemişlerdir. [13] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının iki boyutlu yayılımını mansabında Eskişehir bulunan Porsuk Barajı ve mansabında İstanbul bulunan Alibey Barajı için modellemişlerdir. Her iki baraj yıkılması senaryosu için HEC-RAS ve FLO-2D’de yapılan analizlerle baraj yıkılması sonucu oluşacak maksimum akım derinlikleri ve hızları belirlenmiş ve taşkın dalgası oluşma süreleri detaylı olarak verilmiştir. [14] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının üç boyutlu yayılımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada baraj yıkılması, barajı temsil eden düşey kapağın ani olarak kaldırılması ile simüle edilmiştir. Elde edilen veriler, dalga önünde hızın en büyük olduğu, geriye doğru gidildikçe hızın azaldığı ve rezervuarda ise akımda hareketlenmenin çok az olduğunu göstermiştir. Ayrıca dalganın akım doğrultusundaki hız bileşenlerinin yanıl yöndeki hız bileşenlerinden daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. [15], NWS FLDWAV adlı bilgisayar modelini kullanarak Kozan Barajı

üzerinde yaptığı çalışmada, gedik genişliği maksimum ve gedik oluşum süresi minimum iken gedikten çıkan debinin en büyük olduğunu elde etmiştir. [16] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgalarını, Ürkmez Barajı’nın çarpıtılmış fiziksel modeli üzerinde ani yıkılma, trapez gedik ve üçgen gedik senaryolarını incelemiştir. Ani yıkılma senaryosunda, maksimum su derinliklerinin oluştuğunu ve maksimum su derinliğine ulaşma süresinin en kısa olduğunu gözlemlemiştir. [17] yaptığı çalışmada, toprak dolgu barajlarda borulanma ve borulanma nedenli gedik oluşumunu araştırmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda, barajların mansaptan başlayarak membaya doğru borulanmaya maruz kaldığı görülmüştür. [18] farklı uzunluktaki yatay bir borunun farklı yerlere yerleştirilmesi ile borulanmanın tetiklendiği, baraj gövdesi yüksekliğinin 20 ile 35 cm ve memba-mansap eğimlerinin 35° ile 45° arasında değiştiği 12 deney gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda mansap bölgesinde ıslak alan oluşumu, mansap bölgesinde erozyon başlaması ve ilerlemesi (baraj gövdesindeki sedimentin kademeli olarak taşınması) ile gedik oluşumunu içeren 4 yıkım süreci gözlemlemişlerdir. Borulanma nedeniyle oluşan erozyonun genişlemesiyle rezervuardaki su seviyesinde bir düşüş meydana gelmiş ve gedik oluşana kadar düşmeye devam etmiştir. En zayıf kesitten baraj üst kısmının çökmesiyle yıkılma hızlanmıştır. [19] ve [20] yapmış oldukları deneylerde, mansapta yerleşim yerini simüle eden küplerin bulunmasının üstten aşma ve borulanma sonucu meydana gelen baraj yıkılması üzerindeki etkisini araştırmışlar ve mansapta yerleşim yeri olması durumunda yayılan sediment kalınlığının arttığını görmüşlerdir. [21] deneysel ve sayısal olarak yaptığı çalışmalarda baraj yıkılması senaryosunda bitki örtüsünün etkisini incelemiştir. Elde edilen veriler bitki örtüsü olarak yapılmış deneylerle karşılaştırılmış ve bitki örtüsü mevcudiyetinin yerleşim yerlerini taşkın dalgasının olası zararlarından koruduğu belirlenmiştir.

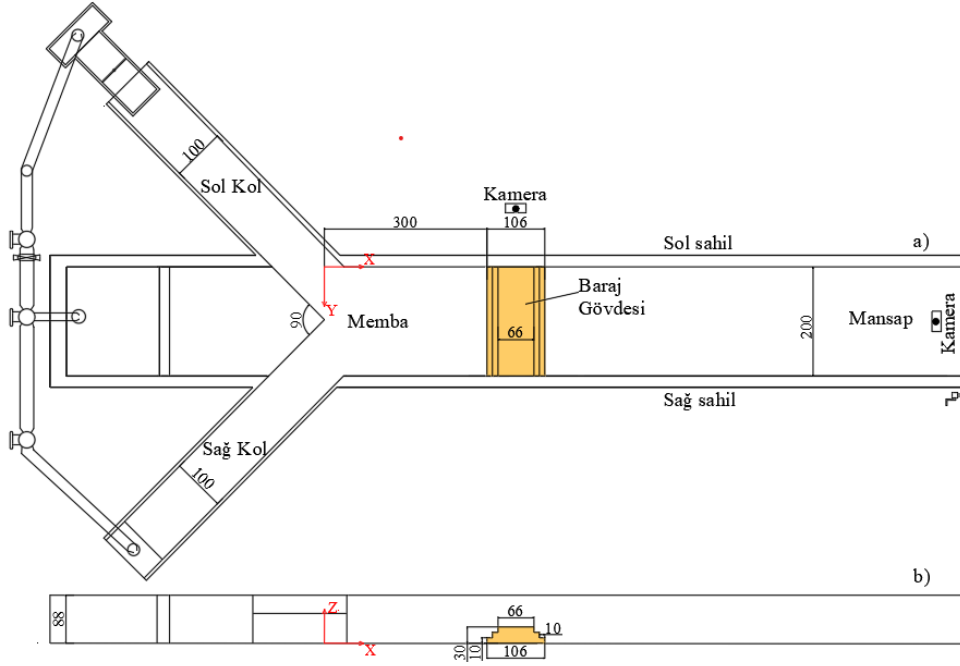
Tarih boyunca verilen örneklerde de görüldüğü gibi barajların yıkılması maddi zararların yanı sıra ciddi felaketlere de neden olabilmekte, insan ve diğer canlıların yaşamında önemli tehlikeler yaratabilmektedir. Bu nedenle, baraj yıkılmalarının nedenlerini ve sonuçlarını incelemek oldukça önemlidir. Barajın yıkılması sonucu taşkın dalgasının yayılma ve hidrodinamik özelliklerinin anlaşılması mühendislik çalışmaları arasında özel bir önem taşımaktadır. Taşkın dalgası ile beraber ilerleyen baraj gövdesindeki malzemeler, dipteki katı maddeler ve sediment taşınarak mansap bölgesindeki vadide boşluklar ve birikimler oluşturur. Bu sebeple barajın yıkılması sonucu yayılan sedimentin barajın mansabındaki etkisini incelemek de taşkın dalgasının hareketi kadar önemlidir.

Barajların yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının hidrodinamiği ile ilgili modeller literatürde yer almaktadır ancak baraj yıkılmalarında sediment hareketi ve yayılması ile ilgili çalışmalar daha azdır.

Bu çalışmada, suyun üstten aşması ve borulanma nedeniyle toprak dolgu barajların yıkılması deneysel olarak ele alınmış ve her iki tip yıkılma sonucu oluşan sel dalgası ile barajın mansabına doğru hareket eden sedimentin yayılımı incelenmiştir.

2. Deneysel Düzenegi ve Deneysel Yöntem

Bu çalışmadaki deneyler, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı’nda bulunan 18 m uzunluğunda, 2 m genişliğinde ve 0,88 m derinliğinde betonarme bir kanalda gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Ana kanala 45° açıyla bağlı ve her biri 1 m genişliğinde ve 4,9 m uzunluğunda olan iki adet kol yan kol rezervuar hacmini arttırmak amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği a) plan, b) kesit görünümü (birimler cm'dir)

Figure 1. Experimental set-up a) plan, b) side view

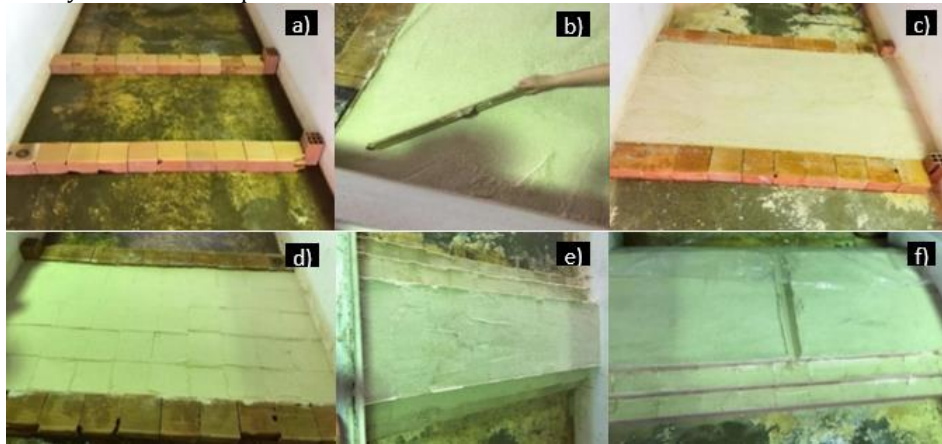
Bodrum katta bulunan depoya bağlı iki paralel hat üzerinde bulunan iki pompa sırasıyla sağ ve sol yan kolu beslemekte olup rezervuar içindeki su bu pompalar yardımıyla depodan sisteme aktarılmıştır.

Dolgu baraj gövdesi 2 m genişliğinde, 1,06 m uzunluğunda ve 0,3 m yüksekliğindedir. Baraj gövdesi, kanalın üçüncü metresine inşa edilmiştir. Homojen tipteki baraj gövdesinin yapımında dolgu malzemesi olarak medyan dane çapı $d_{50}=0,441$ mm üniform sediment kullanılmıştır. Baraj inşası üç aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşamada $19 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 19 \text{ cm}$ boyutlarındaki tuğlalar, kanal üzerine baraj gövdesinin inşa edileceği yere çizilen referans çizgilerine uyularak yerleştirilmiştir (Şekil 2.a). Daha sonra 2 m genişliğinde, 1,06 m uzunluğunda ve yaklaşık 12 cm yüksekliğindeki dolgu malzemesi tuğlalar ile sınırlanan alanın içine düz bir şekilde serilmiş ve su terazisi ile kontrol edilmiştir (Şekil 2.b, Şekil 2.c). Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra, $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 'lik metal plaka alanın bir köşesine yerleştirilmiş ve 1,5 kg ağırlığın 20 cm yükseklikten bu plaka üzerine 10 kez

düşürülmesiyle gövde malzemesinin sıkışması sağlanmıştır. Metal plaka 20 cm kaydırılarak aynı işlem tekrarlanmış ve işlem tüm alan standart bir şekilde sıkıştırılıncaya kadar devam edilmiştir (Şekil 2.d). Ardından yeni bir sıra tuğla ile ikinci katın sınırları boyunca yerleştirilmiştir. Son olarak üçüncü kat dolgu malzemesinin aynı yöntem ile sıkıştırılması ile tamamlanmış ve tuğlalar ortamdan uzaklaştırılmıştır (Şekil 2.e). Her bir katman 10 cm, baraj yüksekliği 30 cm olacak şekilde gövde oluşturulmuştur.

Baraj yapım süreci hem borulanma hem üstten aşma nedeniyle yıkılma senaryoları için toplam iki kere aynı yöntem izlenerek gerçekleştirilmiştir. Baraj gövdeleri inşa edilirken her bir düzenek için yaklaşık 461 kg sediment kullanılmıştır.

Üstten aşma nedeniyle baraj yıkılmasının inceleneceği deneyde yıkılmanın baraj gövdesinin ortasından başlamasını sağlamak için baraj gövdesinin ortasına yaklaşık 5 cm derinliğinde gedik açılmıştır (Şekil 2.f).



Şekil 2. Baraj gövdesi yapım aşamaları a) tuğlaların baraj gövdesinin 1. katı için yerleştirilmesi ,b) sediment yerleştirme işlemi, c) baraj gövdesinin 1. katı, d) sıkıştırılmış katman, e) borulanma deneyinde baraj gövdesi, f) üstten aşma deneyinde baraj gövdesi

Figure 2. Construction steps of the dam body a) placement of bricks for the 1st floor of the dam body, b) process of sediment laying, c) 1st floor of dam body, d) compressed floor, e) dam body in piping experiment, f) dam body in overtopping experiment

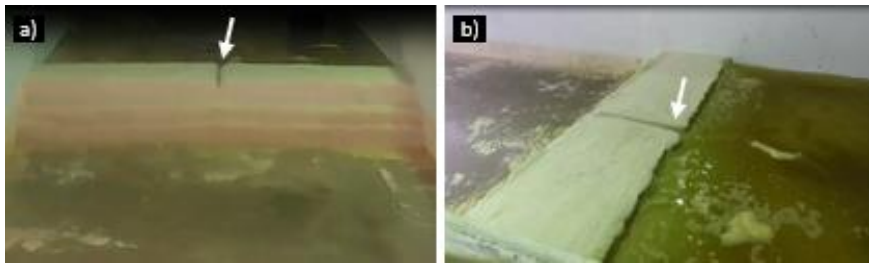
Her iki deneyde de baraj membasındaki hazne su ile doldurulurken baraj gövdesinin zarar görmemesi için baraj memba yüzüne plastik örtü örtülmüştür ve su seviyesi 25 cm'e ulaşana kadar baraj bu örtüyle korunmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Baraj gövdesinin korunması

Figure 3. Protection of the dam body

Üstten aşma deneyinde memba 25 cm'e kadar doldurulduğunda,



Şekil 4. Üstten aşma deney başlangıcı a) baraj mansabı, b) baraj gövdesi

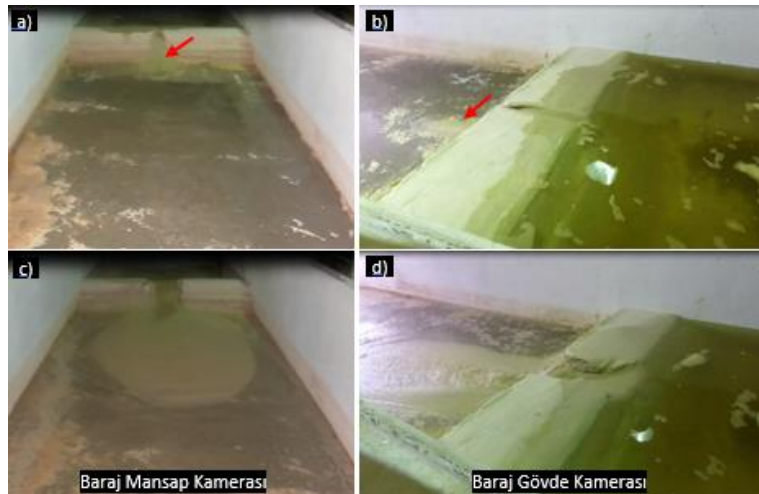
Figure 4. Beginning of the overtopping experiment a) downstream of dam body, b) dam body

3. Deneysel Bulgular

Üstten aşma ve borulanma sonucu yıkılma senaryosunun incelendiği deneylerden elde edilen veriler bu bölümde ele alınmıştır.

3.1. Baraj gövdesinin üstten aşma senaryosu ile yıkılması

Şekil 5'te soldaki şekiller baraj mansap, sağdaki şekiller baraj gövdesi kamerasından alınan görüntüler olmak üzere, deney



Şekil 5. Üstten aşma deneyi başladıktan a)-b) 43 sn, c)-d) 85 sn sonra baraj mansabı ve baraj gövdesi

Figure 5. Downstream of the dam and dam body a)-b) 43 s,c)-d) 85 s after the beginning of overtopping experiment

Şekil 6'da soldaki şekiller baraj mansap, sağdaki şekiller baraj gövdesi kamerasından alınan görüntüler olmak üzere, deney başladıktan 108, 128 ve 159 saniye sonraki durum sırasıyla a-b,

su gedik seviyesine ulaşmış olup bu deneyde, baraj membasındaki su kret seviyesini aşarak baraj mansabına ulaştığında pompa kapatılmıştır (Şekil 4).

Üstten aşma deney başlangıcı ($t=0$ sn), suyun barajın mansap yüzünü aşarak baraj kret genişliği boyunca memba yüzüne ilerlemesi ile gediği geçtiği an olarak tanımlanmıştır [22, 23]. Borulanma deneyinde mambadaki su seviyesi 27 cm'e ulaştığı an deney başlangıcı ($t = 0$ s) olarak kabul edilmiştir. Borulanmanın etkisi deney başında gözlenmeye başlanmış olup baraj gövdesindeki aşınma (sızma-erozyon) yavaş geliştiğinden borulanma deneyi üstten aşmaya göre daha uzun sürmüştür.

Her iki deneyde de kanal mansabına ve baraj gövdesine yerleştirilen kameralar ile yıkılmanın her aşaması kaydedilmiştir. Deneylerin sonunda, sedimentin yayılma uzunlukları ve genişlikleri belirlenmiştir. Kanal boyunca limnometre yardımı ile x ve y eksenlerinde 10 cm aralıklarla yapılan ölçümlerle yıkılma sonrası sediment derinlik profili elde edilmiştir.

başladıktan 43 ve 85 saniye sonraki durum sırasıyla a-b ve c-d ile ifade edilmiştir.

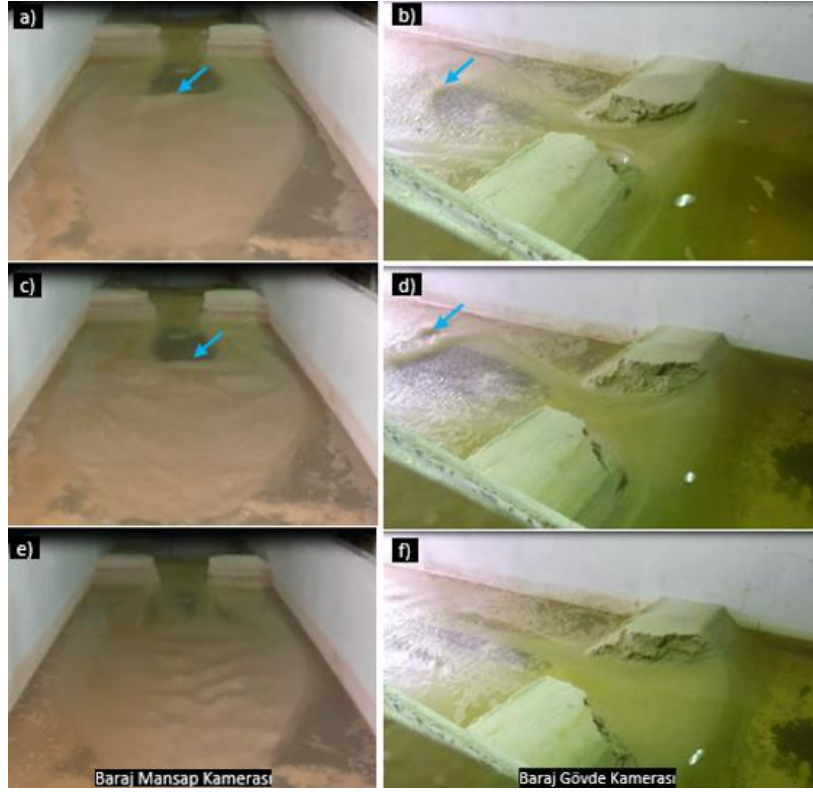
Suyun gediği aşarak baraj mansabına geçmesiyle mambadaki suyun hızı baraj gövdedeki malzemesini sürüklemiş (Şekil 5.a, Şekil 5.b) ve sonrasında kanal tabanındaki sedimenti mansap bölgesine taşımaya başlamıştır. Böylece sedimentin yayıldığı alan artmıştır (Şekil 5.c, Şekil 5.d). Şekil üzerine dikkat çekmek için eklenen kırmızı oklar sediment yayılımını göstermektedir.

c-d ve e-f ile ifade edilmiştir. Taşkın dalgasının başlangıçta daha büyük kinetik enerjiye sahip olması sebebiyle sürüklenen ve kanal tabanı boyunca taşınan sediment zamanla bir eşik

oluşturmuş, bu bölgede su derinliğindeki ani artışla beraber suyun kabarması gözlemlenmiştir (Şekil 6.a, Şekil 6.b). Şekil 6.c ve Şekil 6.d'de görüldüğü üzere, deney başladıktan 128 saniye sonra sağ ve sol sahile doğru da genişleyerek maksimum seviyeye ulaşan su kabarması, 159. saniyede etkisini kaybetmiştir

(Şekil 6.e, Şekil 6.f). Deney başlangıcından itibaren 920 saniye sonunda sediment yayılımı nihai haline ulaşmıştır.

Şekil üzerine dikkat çekmek için eklenen mavi oklar su kabarmasını göstermektedir.

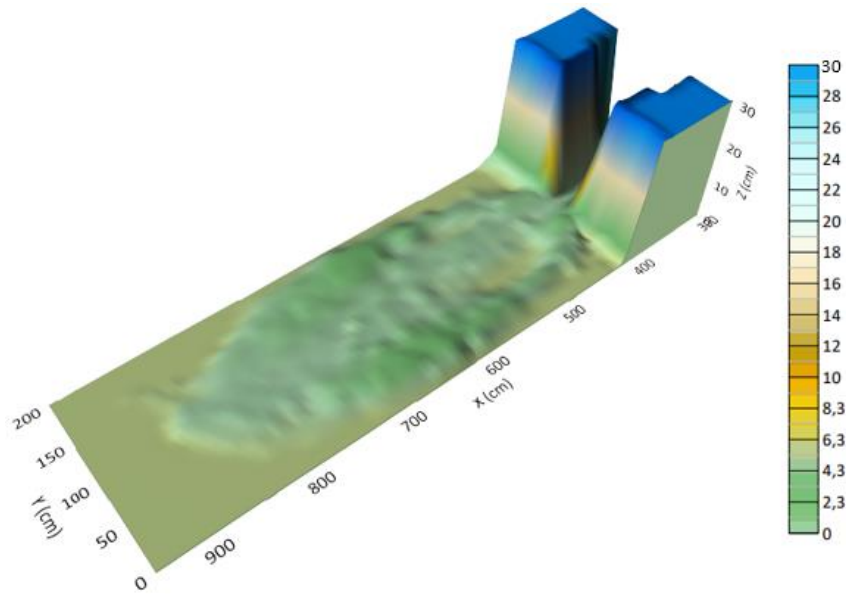


Şekil 6. Üstten aşma deneyi başladıktan a)-b) 108 sn, c)-d) 128 sn, e)-f) 159 sn sonra baraj mansabı ve baraj gövdesi

Figure 6. Downstream of the dam and dam body a)-b) 108 s, c)-d) 128 s, e)-f) 159 s after the beginning of overtopping experiment

Baraj gövdesinin nihai durumuna ulaşmasından sonra alınan derinlik ölçümleri kullanılarak Şekil 7'de gösterilen, barajın 3 boyutlu topografik çizimleri elde edilmiştir. Şekil 7 [13]'ün gözlemlerine göre değerlendirildiğinde, x yönündeki sediment yayılımının y yönündekine göre daha uzun olması taşkın

dalgasının x yönündeki hızının daha büyük olmasının bir sonucu olduğu söylenebilir. Taşkın dalgasının geçtiği kanal ortasında biriken sediment kalınlığının, sağ ve sol sahile göre daha az olması ise dalga eksenindeki hızın daha büyük olması ile açıklanabilir.



Şekil 7. Üstten aşma deneyi sonunda sediment yayılımının üç boyutlu haritası

Figure 7. Three dimensional map of the sediment distribution at the end of the overtopping experiment

3.2. Baraj gövdesinin borulanma senaryosu ile yıkılması

Borulanma deneyinde $t=0$ sn'de rezervuardaki su seviyesi 27 cm iken borulanma etkisiyle baraj mansabında gözlenen erozyon kırmızı ok ile Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Borulanma deney başlangıcında baraj mansabı

Figure 8. Downstream of the dam at the beginning of the piping experiment

Rezervuarda bulunan su, baraj gövdesi içinden çok düşük bir hızla geçerek gövde mansabından, özellikle gövdenin tabana yakın kısmından gövdeyi terk etmiştir. Bu esnada gövde mansabının eteklerindeki sedimenti de harekete geçirerek mansap bölgesindeki erozyona sebep olmuştur. Baraj gövdesinin mansap eteklerinde oluşan erozyon çok yavaş ilerlediğinden tam yıkılma başlayana kadar 27 saat geçmiştir.

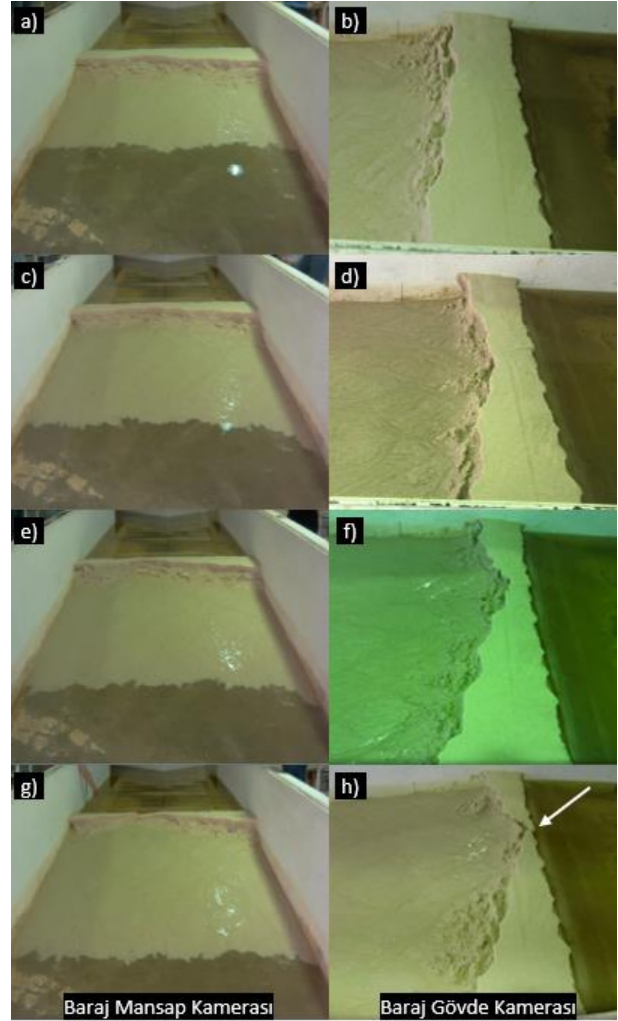
Şekil 9'da soldaki fotoğraflar mansap, sağdakiler baraj gövdesi kamerasından olmak üzere sırasıyla borulanma deneyi başladıktan 3, 23, 24, 27 saat sonra alınan görüntüler a-b, c-d, e-f ve g-h ile gösterilmektedir.

Borulanmanın etkisiyle baraj gövdesi mansap bölgesine doğru yayılmış ve yıkılma gerçekleşinceye kadar baraj kret kesit genişliği azalmaya devam etmiştir. Deney başladıktan 27 saat 4 dakika sonra yaklaşık $y = 140$ cm'de baraj üst kısmının çökmesiyle yıkılma hızlanmıştır. (Şekil 9.h).

Yıkılma başladıktan sonra, Şekil 10'da görüldüğü gibi, yıkılmanın başladığı noktadan mansap bölgesine doğru sedimentin yayılımı devam etmiştir. [10] tarafından yapılan çalışmayla benzer olarak, yıkıcı taşkın dalgasının etkisiyle başlangıçta baraj mansabına yayılmış olan sediment, (Şekil 10.a, Şekil 10.b ve Şekil 10.c'de verilen mavi elips ile gösterilen alan) oyulmaya başlamıştır.

Zamanla kademeli olarak oyulma bölgesinin uzunluğunun ve derinliğinin arttığı, yıkılma başladıktan 155 saniye sonra

($t=27$ s 4 dak+155 sn) maksimuma ulaştığı Şekil 10.c'de görülmektedir.



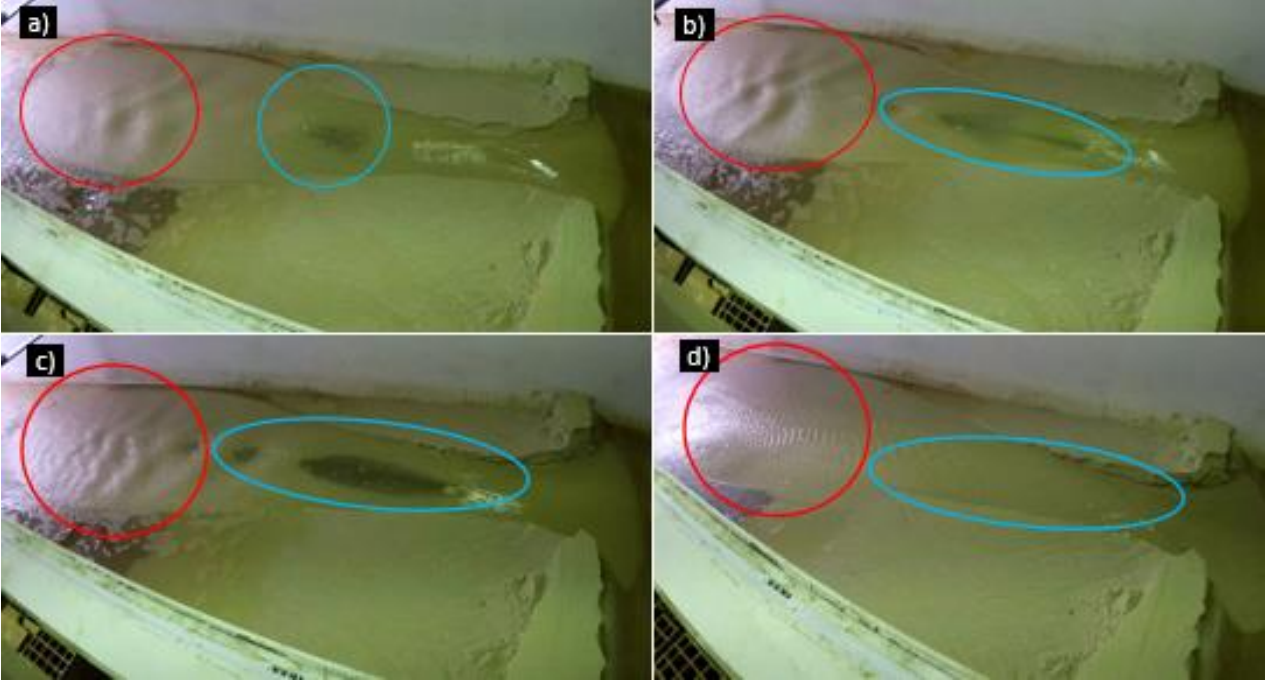
Şekil 9. Borulanma deneyinde baraj mansabı ve baraj gövdesi a)-b) 3 saat, c)-d) 23 saat, e)-f) 24 saat, g)-h) 27 saat

Figure 9. Downstream of the dam and dam body in piping experiment at a)-b) 3 h, c)-d) 23 h, e)-f) 24 h, g)-h) 27 h

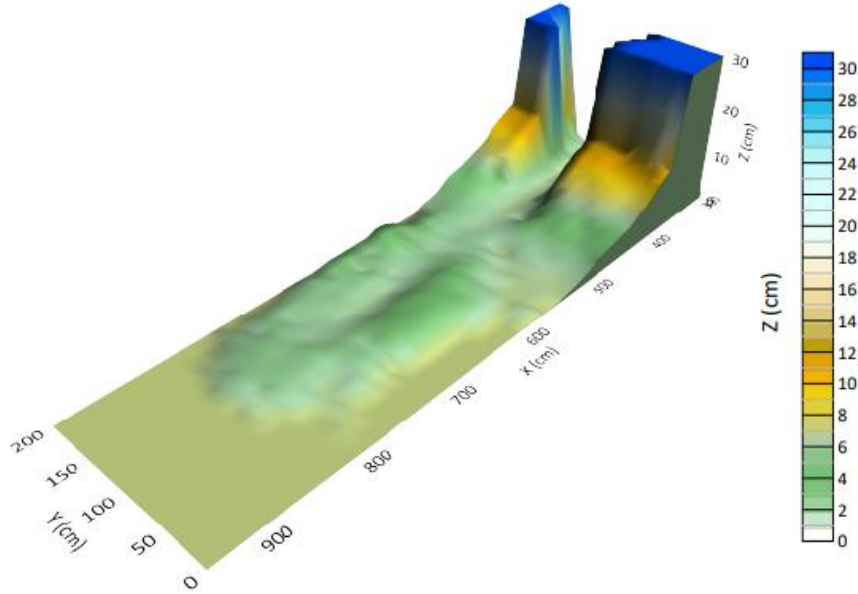
Yıkılmanın ilk 150 saniyesi içinde su kabarmaları gözlemlenmiş olup, başlangıçta baraj mansabında meydana gelen erozyona bağlı olarak üstten aşma deneyinde gözlenen su kabarmasına göre daha sönük özelliktedir (Şekil 10.a, Şekil 10.b, Şekil 10. c'de verilen kırmızı elips). Taşkın dalgasının şiddetinin azalmasıyla yıkılma başladıktan 614 saniye sonra sedimentin tekrar biriktiği gözlemlenmiş (Şekil 10.d'de verilen mavi elips) ve mansap bölgesindeki su kabarması etkisini kaybetmiştir (Şekil 10.d'de verilen kırmızı elips).

Yıkılma başlangıcından itibaren 690 saniye sonunda sediment yayılımı nihai haline ulaşmıştır. Borulanma deneyi boyunca, [18] ile benzer yıkılma süreçleri gözlemlenmiştir.

Deney sonundaki sediment kalınlığı verileri kullanılarak elde edilen 3 boyutlu topografik çizim Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Borulanma deneyinde baraj yıkıldıktan a) 106 sn, b) 116 sn, c) 155 sn, d) 614 sn sonra sediment yayılımı
Figure 10. Sediment distribution in piping experiment a) 106 s, b) 116 s, c) 155 s, d) 614 s after dam break



Şekil 11. Borulanma deneyi sonunda sediment yayılımının üç boyutlu haritası

Figure 11. Three dimensional map of the sediment distribution at the end of the piping experiment

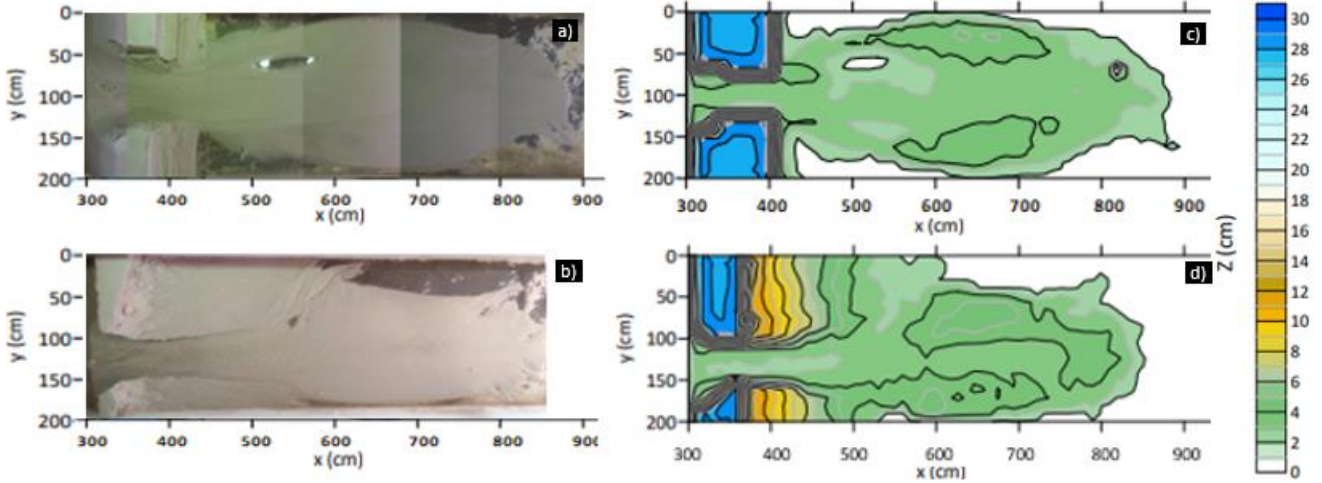
3.3. Yıkılma senaryolarının karşılaştırılması

Şekil 12'de üstten aşma ve borulanma senaryoları için sırasıyla a-b harfleriyle ifade edilen şekillerde deney sonunda barajın kanal boyunca üstten görünümü ve c-d harfleriyle ifade edilen şekillerde ise batimetri grafikleri verilmiştir.

Baraj gövdelerinin hazırlanma koşulları aynı olmasına rağmen, borulanma deneyinde yıkılmanın başlamasına kadar geçen 27 saatlik süre içinde gövdenin içinden geçen düşük hızdaki suyun

izlediği yol ve zayıf hale getirdiği bölgenin (iç dinamik) etkisiyle, gedik ekseninin 40 cm sağ sahile kaydığı ve baraj gövdesinin sağ sahile yakın bölgesinin taşındığı görülmektedir. Ayrıca, 27 saatlik süre içinde baraj gövdesinin mansap kısmı kayarak ilerlemiştir. Üstten aşma deneyinde bu süreç yaşanmadığından yayılan sediment hacmi ve kalınlığı farklılık göstermiştir.

Üstten aşma ve borulanma deneyinden elde edilen genel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 12. Üstten aşma ve borulanma deney sonunda sediment yayılımı a) üstten aşma fotoğrafı, b) borulanma fotoğrafı, c) üstten aşma iki boyutlu harita, d) borulanma iki boyutlu harita

Figure 12. Sediment distribution at the end of the overtopping and piping experiments a) overtopping picture, b) piping picture, c) overtopping two dimensional map, d) piping two dimensional map

Tablo 1. Baraj yıkılma senaryolarının karşılaştırılması

Table 1. Comparison of the dam break scenarios

	Üstten aşma senaryosu	Borulanma senaryosu
Rezervuar Özellikleri:		
Su yüksekliği (cm)	25 cm	27 cm
Su hacmi (m ³)	6,41 m ³	6,92 m ³
Deney süresi ve önemli anlar:		
Baraj yıkılmasına kadar geçen süre	0 saat	27 saat 10 dakika
Toplam yıkılma süresi (sn)	920 sn	690 sn
Mansaba yayılan sediment özellikleri:		
Maksimum genişlik	1,85 m	2 m
Maksimum uzunluk	4,8 m	Bank üzerinde: 1,7 m Gedik mansabında: 4,3 m
Minimum yükseklik	0	Gedik mansabında: 0,78cm
Maksimum yükseklik	3,265 cm	Bank üzerinde: 18,8 cm Gedik mansabında: 6,09 cm
Maksimum yüksekliğin koordinatı (x, y)	(410 cm, 130 cm)	Bank üzerinde: (370, 10) Gedik mansabında: (400, 110)
Ortalama sediment kalınlığı (cm)	1,14 cm	2 cm
Baraj gövdesi gedik özellikleri:		
Genişliği (cm)	140 cm (3 m) / 70 cm (4 m)	80 cm (3 m) / 45 cm (4 m)
Gedik minimum kotu (cm)	9,45 mm	10,7 mm
Deney öncesi gövde hacmi (cm ³)	516000 cm ³	516000 cm ³
Deney sonunda gövde hacmi (cm ³) (300 cm ≤ x ≤ 406 cm arası)	443553 cm ³	326539 cm ³
Gedik hacmi (cm ³) (300 cm ≤ x ≤ 406 cm arası)	72447 cm ³	189461 cm ³

Tablo 1 incelendiğinde, borulanma deneyinde baraj mansap eteğinde meydana gelen erozyon deney başlayıncaya kadar geçen süreyi uzatmıştır. Baraj yıkıldıktan sonra nihai duruma kadar geçen süre üstten aşma deneyinde 920 sn iken borulanma deneyinde 690 sn'dir.

Nihai durumda, yayılan sediment üstten aşma deneyinde 1,85 m genişliğinde ve 4,8 m uzunluğundayken borulanma deneyinde başlangıçta meydana gelen erozyona bağlı olarak baraj genişliği boyunca gövde taşınmıştır ve 2 m genişliğinde, bank üzerinde 1,7 m; gedik mansabında 4,3 m uzunluğunda sediment yayılmıştır.

Borulanma deneyinde sızma-erozyonla baraj gövdesinden taşınan bölgenin taşkın dalgası hızını azaltması; üstten aşma deneyinde meydana gelen daha geniş, daha uzun sediment yayılımını ve yayılan sedimentin kalınlığının daha az olmasını açıklamaktadır.

Üstten aşma deneyinde gediğin baraj ortasından genişlemesiyle taşkın dalgası buradan ilerlemiş ve sedimentin baraj mansabına simetrik yayıldığı gözlemlenmiş, baraj mansabında kanalın sağ ve sol duvarlarına yakın bölgelerde daha fazla sediment biriktiği görülmüştür. Barajın sağ ve sol tarafı ayakta kalmıştır.

Borulanma deneyinde baraj kanalın sağ sahiline yakın bölgeden yıkıldığından, taşkın dalgası baraj gövdesinden taşınan sedimentin sol sahilde birikmesine neden olmuş ve kanalın sol sahilinde yayılan sediment kalınlığının, sağ sahile göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Borulanma deneyinde deney başlangıcından önce geçen zamanda gelişen erozyona bağlı olarak gedik hacmi üstten aşmaya göre daha küçük olmasına rağmen baraj gövdesinden taşınarak yayılan sediment hacmi daha fazla olmuştur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında, homojen toprak dolgu barajların üstten aşma ve borulanma sebebiyle yıkılması sonucunda taşkın dalgasının etkisiyle gerçekleşen sediment taşınımını ve yayılımını belirleyebilmek için iki deney yapılmıştır.

Borulanma nedeniyle barajın yıkılması, baraj rezervuarındaki suyun baraj gövdesindeki sedimenti mansap eteğine taşınması ve kret genişliğinin zamanla azalmasından sonra başladığı için suyun üstten aşması durumundakine göre daha uzun sürmüştür.

Taşkın dalgasının etkisiyle mansap bölgesine üstten aşma deneyinde baraj gövdesinin orta kısmı taşınmışken, borulanma deneyinde 27 saatlik sızma-erozyon süresince suyun izlediği yol ve zayıf hale getirdiği bölgeler gibi iç dinamikler nedeniyle baraj ortasından 40 cm mesafedeki kesitten yıkılma başlamış ve sağ sahile yakın bölge taşınmıştır.

Her iki deneyde de taşkın dalgasının geldiği eksen boyunca yayılan sedimentin kalınlığının daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca taşkın dalgasının etkisiyle oluşan su kabarmasının şiddeti borulanma deneyinde daha düşüktür.

Borulanma deneyinde erozyon, baraj mansap eteğinde sediment kalınlığının üstten aşmaya göre daha fazla olmasına yol açmıştır. Borulanma deneyinde sızma-erozyonla baraj gövdesinden taşınan bölgenin taşkın dalgasını şiddetini azaltması, üstten aşma deneyinde daha uzun ve daha geniş sediment yayılımıyla sonuçlanmıştır. Borulanma deneyinde nihai durumdaki ortalama sediment kalınlığının üstten aşmaya göre daha fazla elde edilmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalarda baraj rezervuarındaki suyun anlık hızları, taşkın dalgasının hızı, taşkın dalgasının yayıldığı bölgede noktasal anlık hız ve türbülans parametreleri ile sediment kalınlığının anlık değişim değerlerinin belirlenmesi daha kapsamlı bilgi edilmesini sağlayacaktır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M959 No'lu Proje ile desteklenmektedir.

Yazar katkılarının beyanı

Deneylerin yapılması ve literatür taraması aşamasında Zehra Büyüker, Ebru Taşkaya, Adile Nur Solmaz, Onurhan Karakaya görev almıştır. Verilerin analiz edilmesi ve makale yazımı kısmını Zehra Büyüker ve Ebru Taşkaya üstlenmiştir. Fikir oluşturma, deneylerin tasarımı ve eleştirel incelemeleri Gökçen Bombar ve Gökmen Tayfur gerçekleştirmiştir.

Kaynaklar

- [1] Orhon, M. 1997. Baraj Tipleri ve Yapım Kriterleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, Cilt. 391, s. 12-16.
- [2] Çalamak, M., Arıcı Y., Yanmaz A.M. 2013. Türkiye'de Baraj Mühendisliğinin Gelişimi Üzerine Bir Değerlendirme. 3rd Hydraulic Structures Symposium. Ankara. Sayı 1. DOI:10.13140/2.1.2943.9686.
- [3] Bozkuş, Z. 2004. Afet Yönetimi İçin Baraj Yıkılma Analizleri, Teknik Dergi, Cilt. 74, s. 3335-3350.
- [4] Xu, Y., Zhang, L.M., Jia, J. 2008. Lessons From Catastrophic Dam Failures in August 1975 in Zhumadian, China. Hong Kong University of Science and Technology, American Society of Civil Engineers, Archived from the original on 2020-03-25.
- [5] Solava, S., Delatte, N. 2003. Lessons from the Failure of the Tton Dam. Forensic Engineering, s. 178-189. San Diego: American Society of Civil Engineers.
- [6] Zorluer, I. 2001. Toprak Dolgu Barajlarda Borulanma ve Bir Borulanma Göçmesi: Teton Barajı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt. 1, s. 135-141.
- [7] Foster, M.A., Fell, R., Spannagle, M. 2000. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents, Canadian Geotechnical Journal, Cilt. 37, s. 1000-1024.
- [8] Fell, R., Wan, C.F., Cyganiewicz, J., Foster, M. 2003. Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Cilt. 129, s. 307-314.
- [9] Wu, W., Altınakar, M., Al-Riffai, M., Bergman, N., Bradford, S., Cao, Z., et al. 2011. Earthen Embankment Breaching, Journal of Hydraulic Engineering, Cilt. 137, s. 1549-1564. DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000498.
- [10] Cao, Z., Pender, G., Wallis, S., Carling, P. 2004. Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed, Journal of Hydraulic Engineering, Cilt. 130, s. 689-703.
- [11] Wu, W., Wang S.S. 2007. One-Dimensional Modeling of Dam-Break Flow over Movable Beds, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE.
- [12] Güney, M.S., Tayfur, G., Bombar, G., Elçi, Ş. 2014. Distorted Physical Model to Study Sudden Partial Dam Break Flows in an Urban Area, Journal of Hydraulic Engineering, Cilt. 140.
- [13] Elçi, Ş., Tayfur, G., Haltas, İ., Kocaman, B. 2017. Baraj Yıkılması Sonrası İki Boyutlu Taşkın Yayılımının Yerleşim Bölgeleri İçin Modellenmesi, Teknik Dergi, Cilt. 28(3), s. 7955-7975.
- [14] Kocaman, S., Güzel, H. 2011. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılımının 3-Boyutlu Deneysel ve Nümerik Karşılaştırılması, Engineering Sciences, Cilt. 6(1), s. 406-414.
- [15] Kocaman, S. 2002. Baraj Yıkılması Analizi ve Uygulaması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- [16] Arıkş T. 2020. Baraj Yıkılması Sonucu Oluşan Taşkın Dalgalarının Deneysel ve Nümerik Metodlar ile Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- [17] Dumlu, E. 2022. Experimental and Numerical Investigation of the Evolution of Piping and Resulting Breach in Earth-fill Dams. İzmir Institute of Technology, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master's Thesis, İzmir.
- [18] Okeke, A. C., Wang, F., Sonoyama, T., Mitani, Y. 2012. Laboratory Experiments on Landslide Dam Failure Due to Piping: an Evaluation of 2011 Typhoon-Induced Landslide and Landslide Dam in Western Japan. Environmental Science and Engineering, s. 525-545.
- [19] Taşkaya, E. 2023. Experimental Investigation of Propagation of Sediment Due to Earth-fill Dam Break. İzmir Katip Çelebi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master's Thesis, İzmir.
- [20] Taşkaya, E., Bombar, G., Tayfur G. 2022. Experimental Investigation of Sediment Movement as a Result of Homogeneous Earth-Fill Dam Overtopping Break over a Simplified Urban Area, Journal of Hydrology, Cilt. 617 (B).
- [21] Oğuzhan Güven, S. 2022. Baraj Yıkılması Durumunda Bitki Örtüsünden Kaynaklı Pürüzlülüğün Taşkın Dalgası Yayılımı Üzerine Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılarak Sonuçların Akıllı Kent Acil Eylem Planında Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.

- [22] Wahl, T.L. 1996. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: Literature Review and Needs Assessment. USBR, Dam Safety Report DSO-98-004
- [23] Demirpençe, H. 1995. Toprak Dolgu Barajların Yıkılması ve Oluşan Taşkın Dinamik Öteleme Metodu ile İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.



Statistical Investigation of the Mineralogical Effect on Blastability in Granitic Rocks

Granitik Kayaçlarda Patlatılabilirlik Üzerindeki Mineralojik Etkinin İstatistiksel İncelenmesi

Orkun Kantarcı ^{1*}, Ayhan Kesimal ²

¹ Şırnak University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, Şırnak, TÜRKİYE

² Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, Trabzon, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: orkunkantarci@sirnak.edu.tr

Abstract

In this study, the effect of physico-mechanical and mineralogical properties of core samples taken from granite rocks obtained from different locations on blastability was statistically analyzed. The relationship between the mineral content of the rocks and rock mechanics parameters was evaluated. The best regression equations with strong relationships ($R^2 > 0.700$) involving the parameters used in the blastability formulas were then obtained. These equations were analyzed for five different blastability indices and the results of the forecasting accuracy analyses (RMSE= 0.000-0.085 and MAPE= 0.06-1.82) showed that the models were quite successful. According to the results of the best forecasting accuracy analysis, the parameters to be considered in the specific charge calculation were mineral content, uniaxial compressive strength, tensile strength, apparent porosity, density and ultrasonic P-wave velocity. As a result of the studies, it was concluded that the mineralogical composition of the rocks had a significant effect on the blastability parameters and lower specific charge values were achieved if the minerals are taken into account.

Keywords: Blastability, Rock Mechanics, Mineralogy, Statistics, MAPE, RMSE

Öz

Bu çalışmada farklı lokasyonlardan temin edilen granit kayaçlarından alınan karot numunelerinin fiziko-mekanik ve mineralojik özelliklerinin patlatılabilirliğe etkisi istatistiksel olarak incelenmiştir. Kayaçların mineral içeriklerinin ve kaya mekaniği parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkisi değerlendirilmiştir. Sonrasında patlatılabilirlik formüllerinde kullanılan parametreleri içeren güçlü ilişkiler ($R^2 > 0,700$) sahip en iyi regresyon eşitlikleri elde edilmiştir. Bu eşitlikler beş farklı patlatılabilirlik indeksine göre incelenmiş ve yapılan tahmin doğruluğu analizlerinin sonuçları (RMSE= 0,000-0,085 ve MAPE= 0,06-1,82) modellerin oldukça başarılı olduğunu göstermiştir. En iyi uyum analiz sonuçlarına göre özgül şarj hesabında dikkate alınacak olan parametreler; Mineral içeriği, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, görünür porozite, yoğunluk ve ultrasonik P-dalga hızıdır. Çalışmalar sonucunda, kayaçların mineralojik bileşimlerinin patlatılabilirlik parametrelerine önemli etkisinin olduğu ve minerallerin dikkate alınması durumunda daha düşük özgül şarj değerlerine ulaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Patlatılabilirlik, Kaya Mekaniği, Mineraloji, İstatistik, MAPE, RMSE

1. Introduction

As a source of raw materials, mining has always been an essential engineering area for humanity. Blasting, which is used in the excavation process and where each step involves significant costs, has become a sensitive area in this sector. Recently, blasting has played an important part in both the mining and construction sectors, particularly with regard to tunneling and transport projects. The results of the blasting have a direct impact on all subsequent process.

In addition to the direct impact on the loading and transportation operations in mining, it also has a significant impact on the ore processing in terms of cost and efficiency through its size reduction. For this reason, the issue of blastability is of great importance in order to fully understand blasting, an important and attention-consuming application. Blastability indicates the sensitivity of the rock mass to explosions and is closely related to

the specific charge [1]. To date, numerous investigations into blastability have been carried out and these investigations used experimental blasting under field conditions.

According to Fraenkel [2], there was an empirical relationship between maximum burden, hole depth, charge diameter and charge height [3]. According to Hino [4], blastability coefficient was the ratio of compressive strength to tensile strength. Hansen [5] gave a formula for estimating the amount of explosives for the corresponding fragmentation required for the Marrow Point dam and power plant project. Sassa and Ito [6], in a study primarily concerned with tunneling applications, proposed the RBF (rock breakage field index) by conducting regression analyzes between crack frequency values and values from laboratory experiments on rock mechanics. Heinen and Dimock [7] defined blastability based on field studies in a copper mine in Nevada (USA) and showed a relationship between specific charge and seismic propagation [3]. Langefors [8] proposed a factor (rock constant)

that indicates the influence of rock. Praillet [9] defined the burden value as a function of bench height, charge density, detonation velocity, setting height, uniaxial compressive strength, and type of loading equipment [10]. Borquez [11] calculated the blastability factor (Kv) by correcting the drilling equation for the burden using RQD (Rock Quality Designation) with the alteration coefficient [1,10]. Ashby [12] empirically determined the specific charge required for blasting in the Bougainville copper mine (Papua New Guinea) based on the effective internal friction angle, which represent the strength of the rock mass and the crack frequency, which represent the crack density. Leighton et al. [13] developed an equation using the RQI (Rock Quality Index) value proposed by Mathis and a rotary drill [10,14]. Rakishev [15] defined blastability as the resistance to cracking by blasting. Lopez and Jimeno [16] proposed the drilling index for rock character, taking into account the limitations of the RQI [10]. The blasting index developed by Lilly [17] was derived from rock mass properties such as crack density and orientation, specific gravity and hardness. Ghose [18] suggested a geomechanical rock mass classification system and correlated specific charge with blastability under coal mine conditions [1,10]. Gupta et al. [19] attempted to estimate specific charge (kg/m³) values for different rock strengths based on field data [1,3]. JKMR [20] conducted blastability analysis of the coal layer and classified rock mass properties affecting blast performance [21].

Han et al. [22] used artificial neural networks (ANN) to define the blastability of a rock mass. They designed a back propagation network with 6 input, 5 hidden and 1 output processing elements. The concept of blastability was defined in the study by Rustan et al. [23] as the ability of rock to be fragmented by blasting. The most important physical and mechanical rock properties for blastability; Gokhale [3] explained the blastability index specified by the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) about sample blastability in his book. Sawmliana and Pal Roy [24] suggested blastability for the French coal production technique of gallery fan-shaped blasting where roof management is difficult.

In the literature, the effect of mineralogy on the mechanical and physical properties of rocks examined [25], however no study on the mineralogical effect on blastability was found. Within the scope of this study, the parameters that may have an effect on blastability other than the parameters mentioned in the literature were tried to be statistically revealed as a result of petrographic analysis and rock mechanics experiments, and to express the extent of their effects through Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Root Mean Square Error (RMSE) and R².

2. Materials and Methods

2.1. Material

Rock mechanics tests, mineralogical investigations and statistical studies were carried out on granite samples taken from five different regions in the Eastern Black Sea Region. The granite samples used in the study were obtained from Doğankent (Harşit) district of Giresun (1 piece), Of district of Trabzon (2 pieces) and İkizdere district of Rize (2 pieces). Mineralogical investigations of the samples were carried out at General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA, TÜRKİYE), and rock mechanics tests were carried out at Karadeniz Technical University, Department of Mining Engineering [26].

2.2. Methods

Core samples were prepared according to standards. Uniaxial compressive strength test (UCS), determination of elastic modulus (Young's modulus; E) and Poisson's ratio (ν), triaxial compressive strength test (TCS; c , ϕ), indirect tensile test (ITS; σ_t), density (ρ), unit volume weight (UVW), apparent porosity test (n) were performed according to ISRM [27] and ultrasonic P-wave velocity test (V_p) was performed according to ASTM-D2845 [28].

Based on the data obtained, a statistical analysis was carried out. In our study, the package program SPSS 17.0 was used to statistically evaluate the results. In rock engineering, researchers use multiple regression analyses to create a predictive model among relevant rock properties. Multiple regression analysis showed better predictive performance than simple regression analysis on rock mechanics properties.

After determining that the data were normally distributed, correlation analysis was performed to determine the degree of relationship between the variables. Upon identification of the correlated parameters, the relationship between these parameters was expressed mathematically using multiple regression analysis. In the analysis carried out using the ENTER method, the effects of the independent variables with correlation between them were observed. Therefore, the STEPWISE method was preferred in the multiple regression analysis. Whether the mathematical model formed as a result of the analysis is significant or not is determined by F and Sig. value in the output of the ANOVA analysis. As Sig. < 0.05, the model is significant. The aim of the stepwise method is to find a solution to the multicollinearity problem. The problem of multicollinearity is that the mathematical expression becomes meaningless due to the correlation between the independent variables that we add to increase the explanation rate of the dependent variable. Hence, selecting stepwise will determine the strongest model by eliminating the models that are correlated with each other. The relationship between the rock properties was determined by the Pearson correlation coefficient, and the degree of linear relationship between them was calculated by regression analysis.

Regression analysis provides an equation that mathematically expresses the degree of relationship between a dependent variable and one or more independent variables [29]. In regression analysis, the value of the coefficient of determination (R²) indicates the rate at which a change in the dependent variable is expressed by the independent variables added to the independent model [30]. In addition, the "F-statistic", which shows the significance of the mathematical models obtained as a result of regression analysis, and the "Sig. value" are important for the interpretation of regression models. If Sig. Value (p) < 0.05, it is concluded that this model is a significant model [31].

Beside the correlation coefficient, analysis of forecasting accuracy analyses (RMSE and MAPE) were calculated to verify the predicted performance of the models with the estimated and measured data, and the prediction performance both models were compared.

The percent prediction error (Eq. 1) was calculated to determine how close the prediction values were to the measured values. Although the values for MAPE (Eq. 2) and RMSE (Eq. 3) always take positive values, the ideal value is close to zero (Table 2.1.) [32].

$$\text{Prediction Error (\%)} = \frac{y - y'}{y} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\text{MAPE (\%)} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y - y'}{y} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (3)$$

y is the measured value and y' is the predicted values and N is the number of data.

Table 2.1. Classification of MAPE values [32,33]

MAPE (%)	Evaluation
MAPE ≤ %10	Very good prediction
% 10 < MAPE < % 20	Good prediction
% 20 < MAPE < % 50	Acceptable prediction
MAPE > % 50	False prediction

Data from rock mechanics experiments and petrographic studies of granites were applied to blastability formulas to calculate direct blastability values. The parameters that directly and indirectly affect the blastability were then tested by replacing the relevant parameters with mathematical models resulting from a regression analysis. The results were evaluated using the RMSE and MAPE values.

When determining the parameters used in the studies, a few principles were first established. These principles are: 1. When more than one parameter was present, only one parameter at a time and other parameters affecting it indirectly were applied in the regression analysis to understand their individual effects. 2. Average values representative of the granites were used for the analysis. 3. Since the formation of minerals was a natural process, they were taken into account directly in model identification and

were not considered dependent variables and were not replaced by any model.

According to the above principles, the relationships were studied, and the success of the models was demonstrated by analysis of forecasting accuracy between the directly obtained and the calculated results. The aim of the calculations carried out in this study was to demonstrate the need to investigate the parameters that influence blastability not only alone, but in a variety of ways. It was statistically proven that the neglected parameters also have an influence.

3. Results and Discussion

3.1. Physical and Mechanical Properties of Rocks

The mineralogical composition of Harşit (H), Hayrat Gray (HG), Hayrat Yellow (HS), İkizdere Yellow (İS) and İkizdere Blue (İM) samples were given in the table (Table 3.1). The results of the rock mechanical tests, which indicate the physical and mechanical properties of the rocks, were shown in Table 3.2. Of the rock mechanical data, only the parameters that influence blastability were analyzed in comparison to the literature.

Table 3.1 Mineralogical composition of Granitic rocks

Samples	Mineral Percentages (%)				
	İM	İS	HS	HG	H
Quartz	25	45	35	35	25
Alkali feldspar	30	35	40	40	30
Plagioclase	40	15	15	10	35
Mafic Minerals	4	4	5	5	8
Others	1	1	5	10	2

Table 3.2. Physical and mechanical properties of granites

Granite Group	ρ (g/cm ³)	UCS (MPa)	ITS (MPa)	Vp (km/sn)	n (%)	c (MPa)	φ (o)	E (GPa)	v
İM	2.639	181.28	12.50	4.682	0.60	17.84	63	67.05	0.21
İS	2.613	112.39	11.46	3.658	0.85	13.55	60	47.21	0.25
HS	2.619	148.39	10.83	4.131	0.98	19.81	57	45.97	0.25
HG	2.621	153.23	10.78	4.243	0.86	19.56	59	60.03	0.22
H	2.699	206.89	14.66	4.695	0.56	23.72	60	69.14	0.20

ρ: Density, UCS: Uniaxial Compressive Strength, ITS: Indirect Tensile Strength, Vp: Ultrasonic P-Wave Velocity, n: Apparent Porosity, c: Cohesion, φ: Internal Friction Angle, E: Modulus of Elasticity, v: Poisson's Ratio

3.2. Statistical Analysis

3.2.1. Simple and multiple regression tests

In studies on blastability, the most effective parameters from the physical and mechanical properties of rocks were density (ρ), modulus of elasticity (E), ultrasonic P-wave velocity (Vp),

uniaxial compressive strength (UCS), indirect tensile strength (ITS), internal friction angle (φ) values. In the statistical analysis tests, simple and multiple regression tests were performed and only the models with R² values above 0.700 (Table 3.3.) within the significant values of the resulting data were used in the explosibility calculation.

Table 3.3. Statistical analysis of dependent variables affecting blastability

Dependent Variable	Equation No	Regression	Compliance Test	Anova Test	
ρ	D1	$\rho = 2.634 + 0.015 * Maf - 0.093 * n$	$R^2 = 0.889$	F: 87.982	Sig.: 0.000
E	D2	$E = 35.665 + 15.675 * Vp - 197.636 * v$	$R^2 = 0.758$	F: 34.434	Sig.: 0.000
	D3	$E = -58.546 + 31.119 * Vp - 215.472 * v + 0.974 * K$	$R^2 = 0.807$	F: 29.360	Sig.: 0.000
Vp	D4	$Vp = 2.385 + 0.012 * UCS$	$R^2 = 0.902$	F: 212.166	Sig.: 0.000
	D5	$Vp = 5.977 - 0.051 * K$	$R^2 = 0.853$	F: 133.200	Sig.: 0.000
	D6	$Vp = 2,421 + 0.014 * UCS - 0.087 * Maf$	$R^2 = 0.953$	F: 222.198	Sig.: 0.000
UCS	D7	$UCS = -166.242 + 76.295 * Vp$	$R^2 = 0.902$	F: 212.166	Sig.: 0.000
	D8	$UCS = 296.391 - 4.120 * K$	$R^2 = 0.851$	F: 130.897	Sig.: 0.000
	D9	$UCS = -152.806 + 65.151 * Vp + 6.592 * Maf$	$R^2 = 0.967$	F: 321.773	Sig.: 0.000
	D10	$UCS = -533.214 + 61.533 * Vp + 4.098 * Maf + 154.981 * \rho$	$R^2 = 0.973$	F: 250.992	Sig.: 0.000
ITS	D11	$ITS = -54.472 + 27.127 * \rho - 0.144 * AF$	$R^2 = 0.784$	F: 39.863	Sig.: 0.000
	φ	D12	$\phi = 77.643 - 0.414 * AF - 0.643 * Maf$	$R^2 = 0.867$	F: 71.720
φ	D13	$\phi = 73.728 - 0.359 * AF - 0.730 * Maf + 0.042 * E$	$R^2 = 0.915$	F: 75.043	Sig.: 0.000
	D14	$\phi = 73.453 - 0.243 * AF - 0.799 * Maf + 0.035 * E - 3.937 * n$	$R^2 = 0.942$	F: 81.840	Sig.: 0.000

3.2.2. Blastability Analysis
3.2.2.1. Blastability According to Hino

In the study by Hino [4], compressive and tensile strengths were used as rock mechanical parameters. The aim here was to demonstrate how close the coefficient value calculated with the values of the existing parameters taking into account the equation from Hino [4] was and the coefficient value calculated with the parameters determined from the regression model. For this reason, in this study, the direct effect of the strength

parameters on the blastability was evaluated by replacing the strength parameters and then the indirect effect parameters were evaluated using high R² regression models expressing the compressive strength (Table 3.4). The parameters, that directly affect the Hino [4] equation, were UCS and ITS. According to the forecasting accuracy analysis, the best results were obtained with equations D10 and D9 (ITS constant) and D11 (UCS constant), respectively. Consequently, V_p, mafic mineral content and density were the primary parameters, beside quartz content and alkali feldspar content also influence the blastability.

Table 3.4. Direct and indirect calculation of blastability with rock mechanics parameters according to Hino [4].

Blastability Formula	Direct Account		Indirect Account				
	Equation		ITS (constant)			UCS (constant)	
			D8	D7	D9	D10	D11
$\text{Blastability coefficient} = \frac{UCS}{ITS}$	Sample name						
	IM	14.502	15.471	15.278	14.288	14.422	14.163
	IS	9.807	9.685	9.847	9.763	9.88	9.885
	HS	13.702	14.053	13.752	13.785	13.607	13.727
	HG	14.214	14.118	14.609	14.526	14.339	14.097
	H	14.113	13.192	13.094	14.039	14.104	14.347
	RMSE		0.622	0.6	0.177	0.085	0.195
MAPE		3.54	3.22	1.04	0.58	1.16	

3.2.2.2. Blastability According to Ashby

The Ashby [12] equation differs from the Hino [4] equation in that it calculates the specific charge directly. Considering the blastability equation presented in his study, he used density, internal friction angle, and crack frequency. In this equation, Ashby [12] attempted to explain blastability by considering the intrinsic parameters between discontinuities and grains. Density and angle of internal friction were parameters that are directly substituted and the other parts were assumed to be constant

(Table 3.5). The roughness angle was considered within the internal friction angle, while the crack frequency was taken to be 10, which corresponds to the bedrock transition zone reported in his study. By direct calculation, it was calculated that the blastability of the granites in the study varies between 1.0 and 1.3 kg/m³. When evaluated with regression models, the calculated specific charge was between 1.0 and 1.3 kg/m³, as in the direct calculation, and was above the specific charge value given by Dyno Nobel (0.7 to 0.8 kg/m³) [34].

Table 3.5. Direct and indirect calculation of blastability with rock mechanics parameters according to Ashby [12].

Blastability Formula	Direct Account		Indirect Account			
	Equation		Internal Friction Angle (constant)		Density (kg/m ³) (constant)	
			Density	D1	D12	D13
$\text{Specific Charge} = \frac{0.56 \cdot \rho \cdot \tan(\phi + i)}{\sqrt[3]{\text{crack}/\text{meter}}}$	Sample name					
	IM	1.347	1.346	1.326	1.338	1.344
	IS	1.177	1.178	1.205	1.188	1.179
	HS	1.049	1.048	1.084	1.075	1.068
	HG	1.134	1.137	1.085	1.101	1.110
	H	1.215	1.217	1.219	1.216	1.215
	RMSE		0.000	0.032	0.020	0.014
MAPE		0.14	2.38	1.42	0.86	

As can be seen from the values in Table 3.5, the RMSE and MAPE values obtained when the regression models were substituted for the density and internal friction angle values used in Ashby's [12] study were close to perfect. Furthermore, ρ and φ directly affected the angle, while Maf, n, AF and E indirectly affected the blastability. Alkaline Feldspar content, Mafic Mineral content, Modulus of Elasticity and Apparent Porosity values had a strong effect on blastability when MAPE and RMSE values in multiple regression were analyzed. This was seen in the analysis calculated according to equations D1, D14 and D13.

3.2.2.3. Blastability According to Rakishev

Rakishev's [15] examined the influence of the mechanical properties of many rocks on blastability and attempted to calculate a critical velocity required for cracking. He tried to explain the blastability of the rock based on the calculated speed.

Rakishev [15] used compressive strength, tensile strength, density and ultrasonic P-wave velocity in his formula. In the study conducted by Rakishev [15], the average k was 0.964, the g was 9.807 m/s² and the average dn was 0.51 m, which were found from the values given for granodiorite rocks. RMSE and MAPE values were calculated between the predicted and actual values

and RMSE and MAPE, the best value, were performed (Table 3.6a,b).

Table 3.6a. Direct and indirect calculation of blastability with rock mechanics parameters according to Rakishev [15].

Blastability Formula	Equation	Direct Account (km/s)	Indirect Account (km/s)				
			UCS, Vp, ITS (constant)		ρ, Vp, ITS(constant)		
			Density	UCS			
		D1	D8	D7	D9	D10	
$k \sqrt{\frac{g \cdot d_n}{\rho \cdot V_p} + \frac{0.1 \cdot UCS + ITS}{\rho \cdot V_p}}$	Sample name						
	İM	4.635	4.636	4.733	4.713	4.613	4.627
	İS	4.531	4.529	4.516	4.536	4.525	4.540
	HS	4.529	4.530	4.564	4.534	4.537	4.519
	HG	4.503	4.496	4.494	4.541	4.533	4.515
	H	4.946	4.943	4.839	4.828	4.937	4.945
	RMSE		0.000	0.068	0.066	0.020	0.000
	MAPE		0.06	1.12	1.02	0.32	0.18

Table 3.6b. Direct and indirect calculation of blastability with rock mechanics parameters according to Rakishev [15].

Blastability Formula	Equation	Direct Account (km/s)	Indirect Account (km/s)			
			UCS, ITS, ρ (constant)			ρ, Vp, UCS (constant)
			Vp	ITS		
		D5	D4	D6	D11	
$k \sqrt{\frac{g \cdot d_n}{\rho \cdot V_p} + \frac{0.1 \cdot UCS + ITS}{\rho \cdot V_p}}$	Sample name					
	İM	4.635	4.624	4.701	4.673	4.659
	İS	4.531	4.515	4.483	4.539	4.521
	HS	4.529	4.494	4.509	4.570	4.527
	HG	4.503	4.531	4.513	4.567	4.511
	H	4.946	4.943	4.845	4.991	4.927
	RMSE		0.020	0.058	0.042	0.014
	MAPE		0.40	1.04	0.84	0.26

When calculated directly, the resulting velocity values were between 4.5-4.9 km/s. These results were consistent with the values given by Rakishev [15] for igneous rocks in his study in the range of 3.65-4.88 km/s. When analyzing Table 3.6b, it becomes clear that the indirect calculation based on density produces almost perfect results. In the same way, another good result was obtained from the indirect calculation according to equation D10 (MAPE: 0.18, RMSE: 0.000) for ITS and UCS. According to Rakishev [15], the granites used in the study were considered difficult to blast (Table 3.7).

Table 3.7. Correlation between critical crack velocity and blastability [15]

Critical crack velocity (m/s)	Blastability
$3,6 > V_{cr}$	Easy to blast
$3,6 < V_{cr} < 4,5$	Partially easy to blast
$4,5 < V_{cr} < 5,4$	Difficult to blast
$5,4 < V_{cr} < 6,3$	Very difficult to blast
$6,3 < V_{cr}$	Extremely difficult to blast

When Table 3.6 was examined; It was statistically shown that in addition to the directly influencing parameters (density, ITS, UCS and Vp), the quartz content, the mafic mineral content, the alkali feldspar and the apparent porosity also had an influence on the blastability. Taking MAPE and RMSE into account, the results were at a very good level of prediction. The best results were obtained with equations D1, D10 and D11, respectively.

3.2.2.4. Blastability According to Lilly

Lilly [17] proposed a method that is easier to use. According to this method, the condition of the joints (openness and alignment)

was important. The calculated index value was then designated from Figure 3.1 which the number in relation to the specific charge and the required amount of ANFO was determined. In the study by Lilly [17], the rock mechanical parameters that contribute to the equation include; Given the values considered in this study, only the density parameter was used. The blast index developed by Lilly [17] was derived from rock mass properties such as crack density and orientation, specific gravity and hardness. The constant values were taken from his table (RMD:50, JPS:10, JPO:30, H:7) (Table 3.8.). The results of the density substituted regression model are shown in the following table (Table 3.9).

Table 3.8. Blastability index parameters according to Lilly [17].

(Rock mass definition)	RMD	Crumbly/Fragmentable rock mass	10
		Blocky rock mass	20
		Completely massive rock mass	50
(Distance between planes)	JPS	Close range (<0.1m)	10
		Moderate (0.1-1.0 m)	20
		Wide range (> 1.0 m)	30
(Joint plane orientation)	JPO	Horizontal	10
		Branching out of the slope	20
		Normal sheet orientation with slope	30
		Inwardly branched from the slope	40

By analyzing the results in Table 3.9, it was found that the density in indirect calculation had excellent MAPE and RMSE values. It was also found that mafic mineral content and apparent porosity could be used as parameters instead of density. Therefore, taking into account the study of Lilly [17], it was statistically proven that mafic mineral content and apparent porosity had an influence on blastability.

Table 3.9. Direct and indirect calculation of blastability with rock mechanics parameters according to Lilly [17].

Blastability Formula	Direct Account		Indirect Account	
	Equation		ρ	D1
	Sample name			
$\text{Blasting index} = \frac{0.5 (RMD + JPS + SGI + M)}{0.5}$	IM	56.488		56.475
	IS	56.163		56.188
	HS	56.238		56.225
	HG	56.263		56.363
	H	57.238		57.275
		RMSE		
	MAPE			0.06

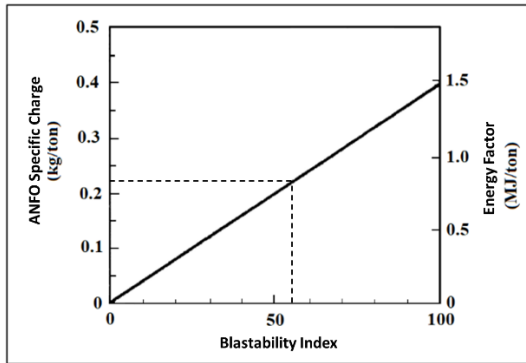


Figure 3.1. Blastability index-specific charge relationship [17].

Considering Figure 3.1, the calculated values for the rocks used in this study varied by approximately 0.23 kg/ton (0.62 kg/m³) and the specific charge values were below and close to the specific charge value (0.7– 0.8 kg/m³) given by Dyno Nobel [34]. According to the result of the MAPE and RMSE analysis, the process had very good predictive values based on the only available variables (Eq. D1).

3.2.2.5. Blastability According to Gupta

In the study conducted by Gupta [19], the parameters specified in the blastability formula included UCS and modulus of elasticity, which are the rock mechanics parameters used in this study, and the rest were considered constant, and the results were given in Table 3.10. The constant burden in Gupta's equation was accepted as 1.2 m considering the field applications [19]. Table 3.10 showed that the best results were obtained with equations D9 and D10 based on UCS. Gupta [19] directly calculates the specific charge (kg/m³) and this value varied between 0.49-0.82 kg/m³ for the rocks studied. As can be seen from the figure below; in Gupta's [19] research, it was statistically revealed that Vp, density and mafic mineral content, quartz content and Poisson's ratio also affect the specific charge. In the calculations made with the models, the specific charge value varies between 0.49-0.84 kg/m³ and was in accordance with the specific charge (0.7-0.8 kg/m³) value range specified by Dyno Nobel [34]. According to the prediction accuracy analysis, the best results are obtained with equations D9, D10 and D3, respectively.

Table 3.10. Direct and indirect calculation of blastability with rock mechanics parameters according to Gupta [19].

Blastability Formula	Equation	Direct Account (kg/m ³)	Indirect Account (kg/m ³)					
			UCS (constant)		E (constant)			
			D2	D3	D8	D7	D9	D10
	Sample name							
$\text{Specific Charge} = \frac{0.278 B^{-0.407} F^{0.6}}{0.278}$	IM	0.722	0.722	0.731	0.786	0.774	0.712	0.720
	IS	0.490	0.524	0.512	0.491	0.501	0.496	0.503
	HS	0.722	0.670	0.677	0.738	0.718	0.720	0.709
	HG	0.619	0.640	0.630	0.625	0.652	0.648	0.637
	H	0.826	0.834	0.841	0.771	0.764	0.833	0.838
		RMSE		0.028	0.024	0.037	0.040	0.014
	MAPE		3.70	3.12	3.78	4.56	1.68	1.82

4. Conclusions

Within the scope of this study, rock mechanics experiments, mineralogical investigation and statistical studies were carried out on granite samples taken from five different regions in the Eastern Black Sea Region ("H" Harşit region, "HG and HS" Of region and "IM and IS" İkizdere region). The findings obtained as a result of the studies were given below.

- As a result of the study, a strong correlation was found between blastability and mineral distribution.
- Considering the study of Hino [4], the best result was obtained from equation D10. The analysis of forecasting accuracy (MAPE

and RMSE) results of this equation containing Vp - Mafic Mineral - ρ were 0.085 of RMSE and 0.58 of MAPE.

- Considering the Ashby [12] study, the best analysis of forecasting accuracy result was obtained with regression equation D14 containing Alkali Feldspar - Mafic Mineral - E - n (RMSE: 0,014, MAPE: 0,86).

- Considering the formula of Rakishev [15], the best result was obtained with equation D1 containing Mafic Mineral-n, where UCS, ITS, Vp were constant (RMSE: 0,000 MAPE: 0,06).

- When the study of Lilly [17] was analyzed, the model was in a very good prediction range. While other parameters were

constant, the best analysis of forecasting accuracy were obtained with equation D1 (Mafic Mineral-n) (RMSE: 0.014, MAPE: 0.26).

- Gupta [19] concluded that when E was constant, the model with equation D9 with Mafic Mineral - n was the best analysis of forecasting accuracy (RMSE 0.014, MAPE 1.82).

As a result of the evaluations made by statistical analysis, it was revealed that mineralogy had an effect on the parameters used in the calculation of blastability and the specific charge value decreased even more when minerals were taken into account. The values given were all in terms of specific charge except Hino [4] and Rakishev [15]. When the calculated values were examined, the parameters to be taken into account in the specific charge calculation according to the best analysis of forecasting accuracy results were mineral content, uniaxial compressive strength, indirect tensile strength, apparent porosity, density and ultrasonic P-wave velocity. In future studies, it is recommended to create a new blastability index including the mineral structure and the mentioned parameters with detailed field and laboratory model blasting studies.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the Ethics Committee or the article prepared.

There are no conflicts of interest with any individual or institution in this article.

Acknowledgment

This article has been produced from PhD thesis named "Investigation of the effect of physico-mechanical and mineralogical properties on the blastability of granitic rocks".

References

- [1] Dey, K. ve Sen, P., 2003. Concept of Blastability – An Update. *The Indian Mining and Engineering Journal*, 42, 8-9, 24 – 31.
- [2] Fraenkel, K.H., 1954. *Handbook in rock blasting technique*, Part-1, Esselte AB, Stockholm.
- [3] Gokhale, B.V., 2011. *Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines*, CRC Press London.
- [4] Hino, K., 1959. *Theory and Practice of Blasting*, Nippon Kayaku Co. Ltd., Asa, Yamaguchi-Ken, Japan
- [5] Hansen, D. W., 1967. *Drilling And Blasting Techniques For Morrow Point Power Plant*. The 9th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 17-19 April, Golden, Colorado.
- [6] Sassa K. ve Ito I., 1974. On the relation between the strength of a rock and the pattern of breakage by blasting, *Proc. 3rd Int. Congress Rock Mechanics Denver*, II-B, 1501-1505.
- [7] Heinen R. H. ve Dimock R.R., 1976. The Use of Sonic Measurements to Determine The Blastability of Rocks, *Proceedings Second Conference on Explosive and Blasting Techniques*, Louisville, Kentucky, 234-248.
- [8] Langefors, U., 1978. *The Modern Technology of Rock Blasting*, John Wiley & Sons Inc, New York, 438.
- [9] Praillet, R., 1980. A new approach to blasting.
- [10] Jimeno C.L., Jimeno, E.L. ve Carcendo, F.J.A., 1995. *Drilling and Blasting of Rocks*, AA-Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- [11] Borquez, G.V., 1981. Estimating Drilling and Blasting Costs and Analysis and Prediction Model. *EEMJ*. January, 83-89.
- [12] Ashby, J.P., 1981. Production blasting and the development of pit slopes, *Proceeding of the 3rd. International Conference on stability in open pit mining*, Vancouver, B.C
- [13] Leighton, J.C., Brawner, C.O. ve Stewart, D., 1982. Development of a correlation between rotary drill performance and controlled blasting powder factors, *Can. Inst. Min. Bull.*, 844, 67-73.
- [14] Mathis, C., 1975. Proposal of a report on Rock Quality Index based on rotary drill Performances, Unpublished paper, University of Alberta, March.
- [15] Rakishev, B.R., 1982. A New Characteristics of the Blastability of Rock in Quarries, *Soviet Mining Science*, 17, 248-251.
- [16] Lopez Jimeno, E. ve Lopez Jimeno, C., 1984. *Las Voladuras en Crater y su Aplicacion ala Minería*, VII Congress International de Minería y Metalurgia, Barcelona
- [17] Lilly P., 1986. An Empirical Method of Assessing Rockmass blastability, *Large Open Pit Mine Conference*, Newman, Australia, 89-92.
- [18] Ghose A.K., 1988. Design of drilling and blasting subsystems – A rockmass classification approach, *Mine Planning and Equipment Selection*, Balkema.
- [19] Gupta, V. ve Sharma, R., 2012. Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya, *Engineering Geology*, 135-136, 1–9.
- [20] JKMR, 1996. *Open pit blast design analysis and optimisation*, Julius Krutchnitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Australia, 338.
- [21] Pal Roy, P., 2005. *Rock blasting effects and operations*, Rotterdam: Balkema, 223–240.
- [22] Han, J., Weiya, X. ve Shouyi, X., 2000. Artificial neural network method of rock mass blastability classification. *Proceedings of the Fifth International Conference on Geo Computation*, London, UK, 23–25.
- [23] Rustan, A., Cunningham, C., Fournay, W., Spathis, A. ve Simha, K.R.Y., 2010. *Mining and Rock Construction Technology Desk Reference: Rock Mechanics, Drilling & Blasting*, Technology & Engineering, 466.
- [24] Sawmliana, C. ve Pal Roy, P., 2012. A New Blastability Index for Hard Roof Management in Blasting Gallery Method, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 6, 1357–1367.
- [25] Ersoy, H. ve Acar, S., 2016. Influences of petrographic and textural properties on the strength of very strong granitic rocks, *Environ Earth Sci*, 75,1461.
- [26] Kantarcı, O. 2017. Investigation of the effect of physico-mechanical and mineralogical properties on the blastability of granitic rocks. PhD Thesis, Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Trabzon (in Turkish).
- [27] ISRM., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*, International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628.
- [28] ASTM D2845, 1983. *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*.
- [29] Bayazit, M. and Yeğen Oğuz, E.B., 2005. *Statistics for Engineers*, Birsen Publishing House, Istanbul, 197p.
- [30] Kılıç, E., 2007 *Statistical analysis of consolidation parameters*, Master Thesis, İstanbul Technical University, Institute of Science, İstanbul.
- [31] Dursun, A.E., 2012. *Cutability of Limestones Located in the Northwest of Konya City Center*, T.C. Selçuk University, Institute of Science, Konya
- [32] Karaman, K., Kaya, A. ve Kesimal, A., 2015. Effect of the specimen length on ultrasonic P-wave velocity in some volcanic rocks and limestones, *A Journal of African Earth Sciences*, 112, 142-149.
- [33] Lewis, C.D., 1982. *International and Business Forecasting Methods*. Butterworths, London.
- [34] Dyno Nobel, 2010. *Blasting and Explosives Quick Reference Guide*.



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

Production and Characterization of Porous Anorthite Ceramics Using Sugar Process Solid Waste, Chamotte and Coal Powder Additives

Gözenekli Anortit Seramiklerin Şeker Proses Katı Atığı, Şamot ve Kömür Tozu Katkıları Kullanılarak Üretimi ve Karakterizasyonu

Vacide Selin Kaya ^{1*}, Mücahit Sütçü ², Emre Yalamaç ³, Onur Ertuğrul ⁴

¹ Ege Üniversitesi, Aliğa Meslek Yüksekokulu, Metalurji Programı, İzmir, TÜRKİYE

^{2,3} Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

⁴ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar *: vacide.selin.kaya@ege.edu.tr

Abstract

Press filter cake is a solid waste produced during sugar production process and includes carbonates and organic components. In this study, coal powder in different percentages (from 10 wt.% to 50 wt.%) was mixed with 35 wt.% press filter cake and 65 wt.% chamotte composition to produce porous anorthite ceramic products with different apparent porosity percentages. The anorthite phase was observed as the dominant crystalline phase in all fired samples. The firing shrinkage values sharply increased after adding higher than 40 wt.% coal powder to composition. In addition, apparent porosity values were changed from 49% to 70%. Compressive strength values reduced from 18 MPa to 1.73 MPa while percentages of ground coal were increasing. Microstructural analysis also showed that the porosity values of the sintered samples showed important changes depending on the amount of coal additive. The thermal conductivity values showed a reduction from 0.113 W/mK to 0.064 W/mK while increasing the percentage of ground coal. Micro-computed tomography (Micro CT) analysis was performed for 40wt. % coal powder added composition and the total porosity value was found as 60.2%.

Keywords: Porous ceramic, Anorthite, Press filter cake waste, Coal powder

Öz

Pres filtre keki, şeker üretim sürecinde ortaya çıkan, karbonatlar ve organik bileşenler içeren katı bir atıktır. Bu çalışmada farklı görünür gözeneklilik yüzdelere sahip, gözenekli anortit seramikler üretmek için, ağırlıkça %35 pres filtre keki ve ağırlıkça %65 şamot bileşimi ile farklı yüzdelerde kömür tozu (ağırlıkça %10'dan %50'ye kadar) karıştırılmıştır. Pişirilen tüm örneklerde anortit fazı baskın kristal faz olarak gözlenmiştir. Bileşime ağırlıkça %40'tan fazla kömür tozu ilave edilmesiyle, pişirme büzülme değerleri hızlı bir şekilde artmıştır. Ayrıca görünür gözeneklilik değerleri %49'dan %70'e çıkmıştır. Kömür tozu yüzdeleri artarken basma dayanım değerleri 18MPa'dan 1,73MPa'a düşmüştür. Mikroyapı analizleri de sinterlenmiş numunelerin gözeneklilik değerlerinin kömür katkı miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Bileşimdeki kömür tozu yüzdesi arttırılırken, termal iletkenlik değerleri, 0,113 W/mK'den 0,064 W/mK'e düşme göstermiştir. Ağırlıkça %40 kömür tozu katkılı bileşim için Mikro bilgisayarlı tomografi (Micro CT) analizi yapılmış ve toplam gözeneklilik değeri %60,2 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gözenekli seramik, Anortit, Pres filtre keki atığı, Kömür tozu

1. Introduction

Anorthite porous ceramics have an area of usage in the insulation field in favor of low thermal conductivity, high purity, and high strength [1]. In recent years, many studies have been published in the literature on the processing of porous anorthite ceramics using both mineral raw materials and waste materials [1-19]. In a study carried out using mineral raw materials, porous gehlenite-anorthite-based ceramics were produced by using calcined kaolin and 28 wt.% calcite and firing at 1250°C for 1h. In the structure, it was measured to have a high porosity of 54% [2]. Another study related to the production and characterization of porous anorthite ceramic based on mineral materials found that the resulting bodies showed apparent porosity values between 28 and 32% [3]. The utilization of various wastes in the production of insulation refractory is a remarkable method of

recycling for the annihilation of several wastes. A significant quantity of waste is used to produce insulation refractory. Rice husk, fly ash, fired refractory grog, and rice husk ash are current wastes. Several specimens are worked on compositions based on partial and full replacement of clay [4]. Calcium carbonate and fly ash cenosphere were put to use in fabricating high apparent porosity ceramics. High apparent porosity was investigated with the addition of calcite. Calcium carbonate constituted the apparent porosity in two ways: the first was that CO₂ emission from CaCO₃ decomposition induced the formation of pores in ceramics; the second was that CaO from calcite decomposition formed into anorthite with fly ash cenosphere. The apparent porosity of a ceramic composition with 30 wt.% CaCO₃ fired at 1250°C achieved 59.25% [5]. Through direct foaming and slip casting, a mixture of gypsum and fly ash constituted porous anorthite ceramics with low thermal conductivity. While 10%

gypsum content was added, anorthite came in the main phase with the least amount of impurity. In addition, with sodium hexametaphosphate as dispersant and using a two-step foaming process, the highest open porosity of up to 94% and the lowest thermal conductivity of 0.042 W/mK were achieved [6]. In research, porous anorthite ceramics were produced from metakaolin, talc, fly ash, and red mud. A sample containing 30 wt.% red mud and 40 wt.% fly ash fired at 1150°C had 38% apparent porosity and 42 MPa compressive strength. Anorthite was detected as the main phase, and the minor phases were mullite, α -quartz, and diopside ferrian. Abundant open pores and closed pores were examined in SEM images, which indicated high porosity and low heat conductivity. In addition, mullite grains with rod-like shapes were present in the porous ceramics. These grains prevented the propagation of cracks in intergranular fractures to raise the compressive strength [7]. In another study, steel slag and high-alumina fly ash microbeads were mixed to produce feldspar-porous ceramics over high-temperature solid-phase sintering by adding pulverulent coal as a pore-forming agent. The ratio of fly ash microbeads to steel slag was chosen at 6:4, and the pore-forming material content was 10%. Porous ceramics with a porosity of 49.21% and a flexural strength of 12.88 MPa were obtained by firing at 1170°C for 2 hours. The main phase of porous ceramics was anorthite [8]. For the production of porous and lightweight anorthite-based insulating ceramics, mixtures of clay, recycled paper processing waste, and sawdust as pore-forming materials were also studied. Recycled paper processing waste consists of organic and inorganic contents. The reaction between calcium oxide from paper processing waste and aluminum silicate from clays resulted in anorthite in the minor secondary phase. Sawdust-added mixtures with anorthite composition promoted the porosity of the samples. It was found that the bulk densities ranged from 1.12 to 0.64 g/cm³, and the thermal conductivities varied from 0.25 to 0.13 W/mK depending on their porosity content [9]. Another study is about the use of three different clays, such as aluminum silicate, clay with alkalis, and fireclay, in the manufacturing of anorthite-based lightweight insulating firebricks. All samples were mixed with 30–40 wt.% paper processing residues, and they were fired at 1200–1400°C. Sintered samples consisted of anorthite as the major phase and mullite or gehlenite phases examined as minor secondary phases in some mixtures [10]. Press filter cake (PFC) is a sugar industry waste that consists of magnesium calcium carbonate, and organic substances. This waste is generally used for fertilization of sugarcane fields and other fields of agriculture [11, 12]. PFC wastes were used for the production of anorthite-based ceramics as CaO sources in the anorthite compositions [13, 16]. Research has shown that it is a useful raw material for the production of anorthite/cordierite and anorthite/alumina composites [17, 18]. In our previous study, it was determined that a 35% press filter cake (PFC) and 65% chamotte (PCH-35) composition, which was fired at 1300°C for 2 hours, showed 49.6% apparent porosity for porous anorthite ceramic [19]. In this study, it was aimed to increase the porosity ratio of the PCH-35 composition by adding coal powder as the pore-forming material in different percentages (10%–50% by weight) for insulation field usage.

2. Materials and Methods

2.1. Characterization of raw materials

PFC was obtained from Eskişehir Sugar Factory, where 50.000 tons of sugar beet filter cake waste are sorted per year. Chamotte was chosen as the alumina silicate and it was supplied from Kaolin Industrial Minerals Co. Coal was procured from an industrial company located in Soma, Turkey. Coal was ground for

5 minutes at 700 rpm by using a disc mill. Ground coal was used as the pore-forming material in the PCH-35 composition [19]. In the beginning, the crystalline phase, chemical composition, thermal behavior, and particle size distribution of raw materials were determined. A X-ray fluorescence spectrometer (EDXRF Spectro IQ II) was used for determining the chemical composition. Phase analysis of the powders was done by an X-ray diffractometer (Bruker D2 Phaser) with a Cu tube of 1.54184 Å at a voltage of 30 kV. Particle size distributions of raw materials were measured by the Malvern Mastersizer 3000. Thermogravimetric analysis (TGA) of the raw materials was carried out under a nitrogen atmosphere at a heating rate of 10°C/min using the TA Instruments TGA-SDT Q600 equipment.

2.2. Preparation of samples with different percentage coal powder addition

PCH-35 composition was prepared and mixed with ground coal in different weight percentages (10% to 50%) for the production of porous anorthite ceramic products. Firstly, the slurry of PCH-35 composition was prepared and dried at 100°C for 24 hours. Then it was crushed to obtain it in powder form. The powder mixture was mixed separately with different percentages (10% to 50%) of ground coal by weight. Powders of mixtures were pressed at 25 MPa pressure, and samples were formed with a 20 mm diameter. Samples were dried at 100°C for 24 hours before sintering.

2.3. Characterization of fired samples

The pressed samples were sintered at 1300°C for 2 hours. They were characterized for present crystalline phases (XRD), physical properties (apparent porosity, bulk density water absorption), thermal conductivity, mechanical properties (compressive strength) and microstructural properties. The physical properties of sintered samples were determined by the liquid displacement method (ASTM C20). Compressive strength was measured by a Shimadzu 100 kN testing machine at a crosshead speed of 0.5 mm/min. Thermal conductivity was studied with C-Therm equipment. The microstructural properties of fired samples were determined by SEM-Quanta 250 FEG. A micro-CT test was applied to the sample that had the highest apparent porosity value.

3. Results and Discussion

3.1. Characterization of raw materials

The chemical composition of chamotte includes about 57.9% SiO₂, 38.8% Al₂O₃, 1.1% Fe₂O₃, 0.9% K₂O, 0.3% Na₂O compounds, and 0.3% loss on ignition. The chemical analysis of PFC waste contains mainly 44.25% CaO, 3.24% MgO, 3.28% Na₂O, 0.33% Al₂O₃, and 48% loss on ignition. In figure 1, the XRD pattern of chamotte indicates the presence of mainly crystalline phases like mullite, quartz, and cristobalite as well as an amorphous phase. The PFC waste has a mainly magnesium-calcium carbonate phase. Coal was used as a pore-forming material in the ceramic body. Carbon, FeO, quartz, and sodium aluminum silicate phases were determined in XRD analysis. Coal was fired for one hour at 1000 °C, and coal ash was obtained. After firing, quartz, cristobalite, sodium aluminum silicate, and FeO phases were identified in the sample (Figure1(d)).

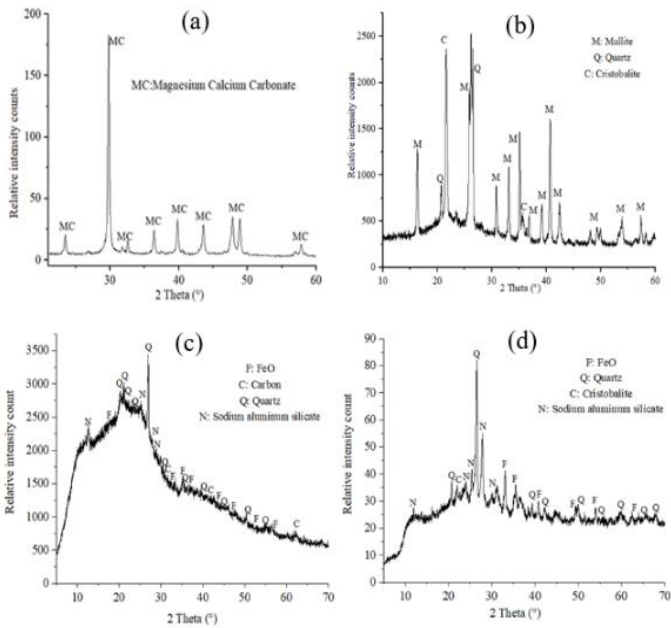


Figure 1. Phase analysis; PFC (a), chamotte (b), coal (c), coal fired at 1000°C (d)

PFC shows a bi-modal particle size distribution curve, and $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$ values of PFC are determined as: 3.83 μm , 13.6 μm and 125 μm , respectively. (Figure 2a). The chamotte particle size was measured less than 139 μm and the average particle size was 38 μm (Fig 2b). $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$ values of the used coal powder are found as follows: 6.19 μm , 51.3 μm and 245 μm , respectively.

Figure 3 shows the TGA results for the raw materials. According to the TGA curve, the total weight loss of PFC is 52.78%. It also indicates that 34.73% carbonate decomposition occurs between 600°C and 800°C. The removal of organic compounds in the waste happens at 300–500°C, and the weight loss appears to be 18%. The TGA curve of coal demonstrates 58.83% weight loss (Figure 3b).

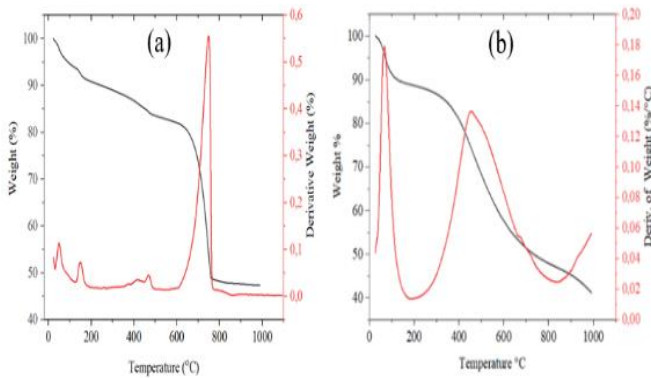


Figure 3. Thermogravimetric analysis; PFC (a) and coal (b)

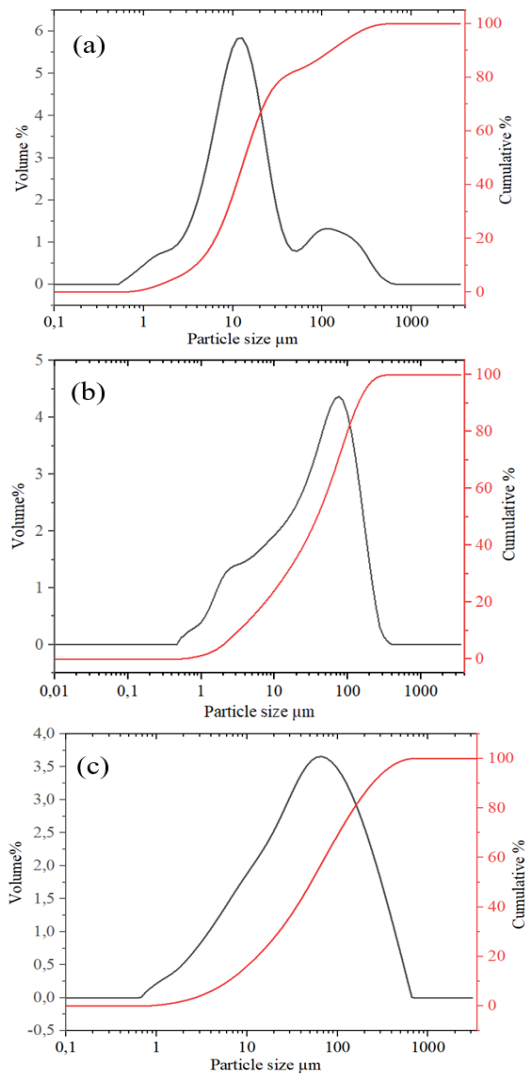


Figure 2. Particle size distribution of the raw materials; PFC (a), chamotte (b) and coal (c)

3.2. Characterization of fired samples

Figure 4 shows the image of the fired samples. Figure 5 indicates the XRD phase analysis of sintered samples. The basic crystalline phase of each fired sample is anorthite, and there is no considerable difference among all the compositions.

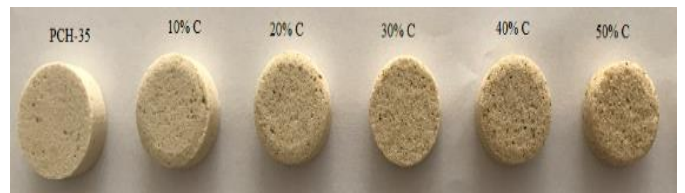


Figure 4. Fired samples

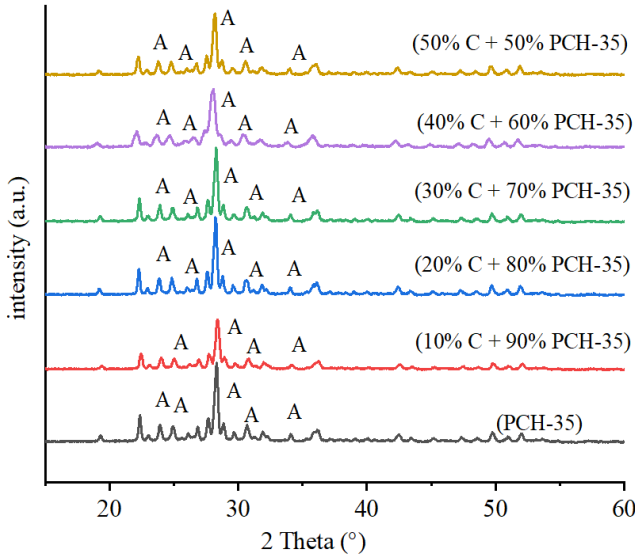


Figure 5. XRD phase analysis of fired samples

The physical properties and compression strength values of the samples were determined using three samples for each composition. The physical properties of the samples sintered at 1300°C are listed in Table 1.

When the percentage of coal increased, firing shrinkage, water absorption, and apparent porosity percentage values increased. On the other hand, bulk density decreased from 1.38 to 0.81 g/cm³. The highest linear firing shrinkage percentage was calculated at 50% ground coal content. This situation is not preferable to fabricate because high firing shrinkage may cause firing cracks in the ceramic body. The fired sample of 40% C + 60% PCH-35 composition showed under 10% firing shrinkage. Also, the apparent porosity percentage was 67%, and the bulk density was calculated at 0.88 g/cm³. According to the results of the physical tests, the 40% C + 60% PCH-35 composition was analyzed by micro-CT. In Figure 6, dark blue areas show the structure of the fired sample. Total porosity was calculated at 60.17%, and the closed porosity percentage was 0.03%.

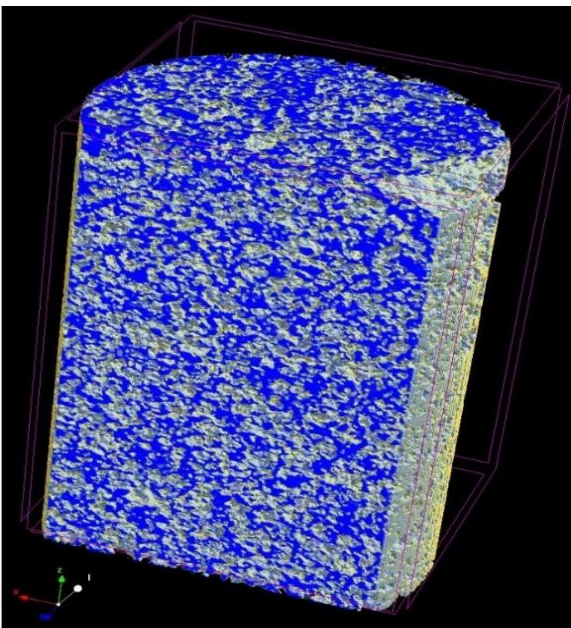


Figure 6. Micro-CT image of fired sample with 40% C + 60% PCH-35 composition

Dilatometric analysis was done for PCH-35, 20% coal-added PCH-35, and 40% coal-added PCH-35 samples fired at 1300°C. They were analyzed for their thermal expansion percentages. The shrinkage (-) and expansion (+) behaviors of fired samples are shown in Figure 7. All samples began to shrink after about 1150°C. The total thermal expansion of the samples up to 1100°C was about 0.05%. The final thermal expansion values of whole samples at 1100°C were measured at 0.05%, and this value showed the stability of fired samples up to 1100°C. The shrinkage measurements of reheated samples with 0, 20%, and 40% coal additive were determined to be 0.05%, 0.2%, and 0.3%, respectively, at 500°C during the cooling process. All samples were thermally and dimensionally stable at temperatures up to 1100°C. The samples that were produced in this study can be safely used up to 1100°C.

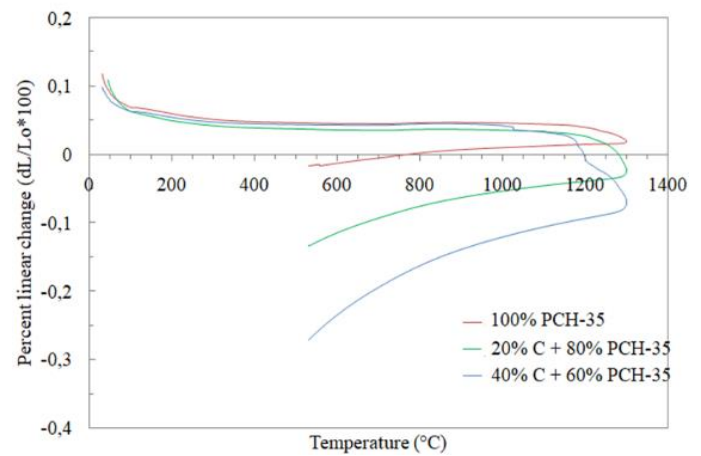


Figure 7. Percent linear changes of the samples during firing

In addition, the initial and final lengths of the samples used in dilatometric analysis were measured. The change in length values was calculated and showed shrinkage of 0.06%, 0.9%, and 1.3% for PCH-35, 20% coal added to PCH-35, and 40% coal added to PCH-35, respectively. As a consequence of the reduction in bulk density with an increase in coal percentage, the compressive strength values of fired samples decreased from 18.78 to 1.73 N/mm², as seen in Figure 8. Wu et al., stated that Synthesized anorthite grains and replenishing the intergranular spaces with liquid phases are effective for high-strength results [20]. Also, polyurethane sponge was used as a template to prepare porous ceramic, and metallurgical steel slag and kaolin were used as raw materials. The compressive strength was measured at 1.5 MPa, and the porosity was 85.3% [21].

The thermal conductivity values for each composition were measured. As seen in Figure 9, the thermal conductivity values of samples fired at 1300°C range from 0.11 to 0.06 W/mK. By increasing the percentage of coal powder, the thermal conductivity values show a decreasing trend. The development of an amorphous phase in the grain boundaries, a large number of nano-regions in anorthite grains, and high porosity accomplish low thermal conductivity in the ceramic body [20].

the fired samples, and a porous structure remained while increasing the content of coal powder.

Table 1. Physical properties of the fired samples.

Composition	Firing shrinkage %	Water absorption%	Apparent porosity %	Bulk density g/cm ³
PCH-35	-3.26±0.01	35.85±0.4	49.30±0.3	1.38±0.01
10% C + 90% PCH-35	-1.07±0.03	46.17±0.5	55.57±0.2	1.20±0.01
20% C + 80% PCH-35	2.52±0.09	57.28±0.03	60.83±0.05	1.06±0.01
30% C + 70% PCH-35	5.35±0.2	68.20±0.5	64.86±0.2	0.95±0.01
40% C + 60% PCH-35	7.5±0.2	76.81±0.2	67.58±0.2	0.88±0.01
50% C + 50% PCH-35	10.71±0.1	86.50±0.5	70.19±0.04	0.81±0.01

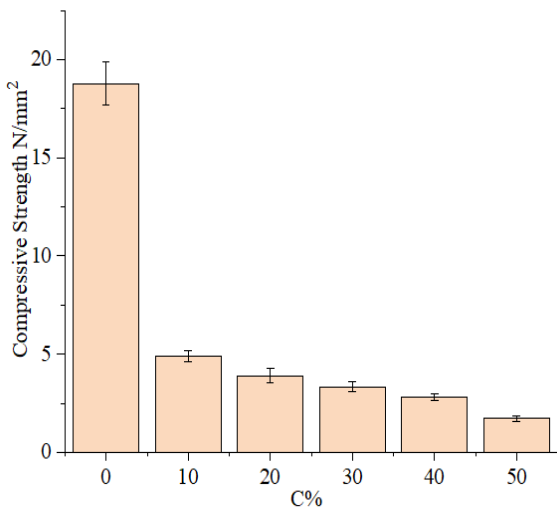


Figure 8. Compressive strength values of the samples with coal addition

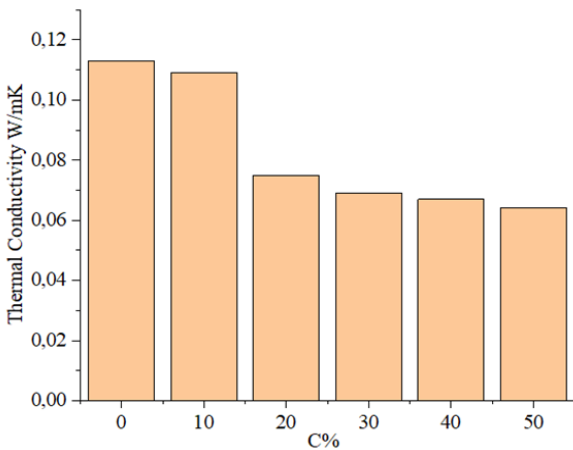


Figure 9. Thermal conductivity values of samples

The microstructural properties of fired samples were determined by SEM-Quanta 250 FEG. Samples were broken, and microstructures were investigated on the broken surfaces. Many open and closed pores were examined using SEM images. This situation ensured low thermal conductivity and high porosity properties in the final product [7]. Figure 10 shows the anorthite crystals formed in the fired ceramic body as well as the effects of the structures formed by the coal dust used as a pore-forming material in production. Anorthite crystals have been observed in

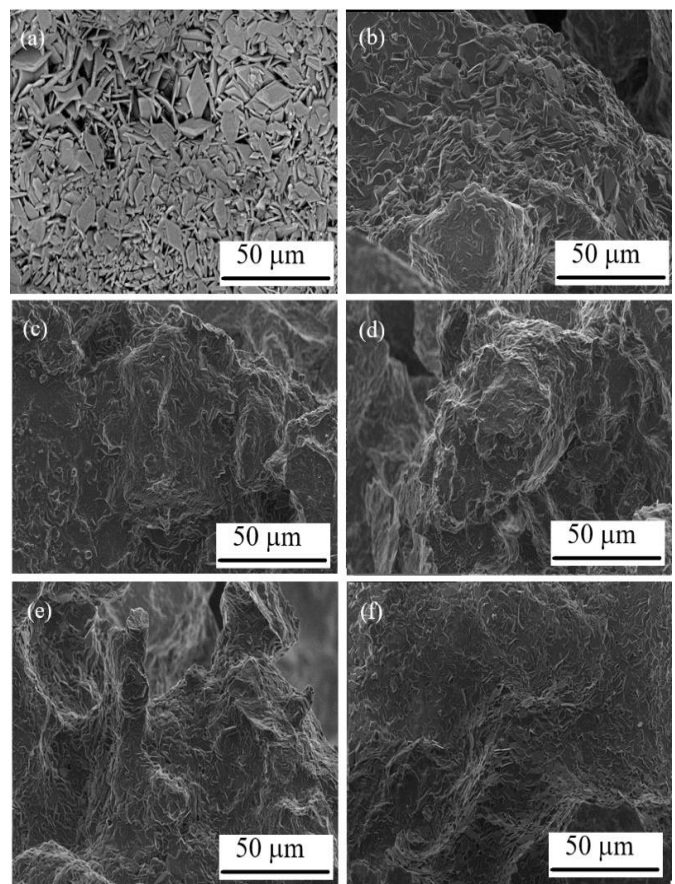


Figure 10. SEM images taken at 2500X magnification of fired samples with different compositions: PCH-35 (a), 10% C + 90% PCH-35 (b), 20% C + 80% PCH-35 (c), 30% C + 70% PCH-35 (d), 40% C + 60% PCH-35 (e), 50% C + 50% PCH-35 (f)

4. Conclusions

PCH-35 (35% press filter cake, 65% chamotte) composition was mixed with ground coal in different percentages (from 10% to 50%) for the production of porous anorthite ceramic in different apparent porosity percentages. The whole fired sample showed a major anorthite phase. Firing shrinkage values were run up after adding more than 40% coal to the PCH-35 composition. 50% of the coal added to the PCH-35 showed 10.7% firing shrinkage. In addition, cracks were observed on the surfaces of 50% of the coal added to the PCH-35 samples. Apparent porosity percentages also increased from 49.3% to 70.19% while increasing the

amount of coal powder because of the combustion of coal powder. In addition, bulk density was reduced from 1.38 to 0.81 g/cm³. As a result of decreasing bulk density, a reduction was observed in compressive strength values from 18.78 to 1.73 N/mm². Thermal conductivity values also supported the apparent porosity results. Thermal conductivity results are reduced with increasing coal powder percentages. According to dilatometric analysis, the final thermal expansion values of whole samples at 1100°C were measured 0.05%, and this value indicated that fired samples were preserving their stability up to 1100°C. The shrinkage measurements of reheated samples with 0, 20%, and 40% coal additive were determined 0.05%, 0.2%, and 0.3% at 500°C during the cooling process. MicroCT analysis of the 40% coal-added PCH-35 composition showed 60.17% total porosity. The microstructural properties of fired samples determined the effect of coal percentages on the structure. A porous structure was procured while increasing the content of coal powder. Fine anorthite crystals were observed in the fired samples.

According to all test results obtained, the PCH-35 sample with 40% coal addition exhibited the best result in terms of thermal insulation. It is thermally and dimensionally stable at firing temperatures up to 1100°C. The thermal conductivity value of the samples with this composition was measured as 0.067 W/mK, and the bulk density and apparent porosity values were 0.88 g/cm³ and 68%, respectively. When compared to previous studies in the literature, it is understood that the thermal conductivity values obtained in this study are lower. In a study, the thermal conductivity value of samples produced by adding 30% wood sawdust as a pore former to the paper waste/clay mixture was found to be 0.13 W/mK [9]. Additionally, the thermal conductivity value of the samples produced by adding 30% expanded polystyrene granules to the chamotte/eggshell waste mixture was found to be 0.11 W/mK [22]. In another study, the thermal conductivity value of samples produced by mixing 30% sawdust into the rice husk ash/diatomaceous earth mixture was measured as 0.09 W/mK [23]. As a result, it was concluded that sugar process solid waste, which is an industrial waste, and coal dust additives can be used as alternative calcium sources and pore formers in the production of anorthite bricks for thermal insulation purposes.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need for an ethics committee approval in the current article. There is no conflict of interest with any person/institution in the current article.

Acknowledgment

This work has been supported by İzmir Katip Çelebi University Department of Scientific Research Projects under the project number 2018-TDR-FEBE-40.

Author Contribution Statement

Vacide Selin Kaya: conceptualization, experimental design, data collection, conducting analysis, literature review, writing; Mücahit Sütçü: conceptualization, experimental design, supervision, conducting analysis, writing, critical review and editing; Emre Yalamaç: conceptualization, experimental design, conducting analysis, writing, critical review and editing; Onur Ertuğrul: conceptualization, experimental design, conducting analysis, writing, critical review and editing.

References

[1] Li C, Han Y, Wu L, Chen K, An L. 2017. Fabrication and properties of porous anorthite ceramics with modelling pore structure, *Materials*

- Letters, Cilt. 190, s.95-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.12.131>
- [2] Zenikheri F, Harabi A, Boudaira B, Bouzerara F, Guechi A, Barama SE, Foughali F, Karboua N. 2016. Elaboration of porous gehlenite and anorthite based ceramics using low price raw materials, *Cerâmica*, Cilt. 62, s. 242-248. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132016623632005>
- [3] Simão L, Caldato RF, Innocentini MDM, Montedo ORK. 2015. Permeability of porous ceramic based on calcium carbonate as pore generating agent, *Ceramics International*, Cilt. 4, s.4782-4788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.031>
- [4] Hossain SK S, Roy PK. 2019. Fabrication of sustainable insulation refractory: Utilization of different wastes, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Cilt. 58(3), s. 115-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.09.002>
- [5] Jiang F, Zhang L, Mukiza E, Qi Z, Cang D. 2018. Formation mechanism of high apparent porosity ceramics prepared from fly ash cenosphere, *Journal of Alloys and Compounds*, Cilt. 749, s. 750-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.303>
- [6] Li Y, Cheng X, Gong L, Feng J, Cao W, Zhang R, Zhang H. 2015. Fabrication and characterization of anorthite foam ceramics having low thermal conductivity, *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt. 35, s.267-275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.08.045>
- [7] Xiang W, Ding Q, Zhang G. 2020. Preparation and characterization of porous anorthite ceramics from red mud and fly ash, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Cilt. 17(1), s. 113-121. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijac.13148>
- [8] Zong Y, Wan Q, Cang D. 2019. Preparation of anorthite-based porous ceramics using high-alumina fly ash microbeads and steel slag, *Ceramics International*, Cilt. 45, s. 22445-22451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.003>
- [9] Sutcu M, Akkurt S, Bayram A, Uluca U. 2012. Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition, *Ceramics International*, Cilt. 38, s. 1033-1041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.08.027>
- [10] Sutcu M, Akkurt S. 2010. Utilization of recycled paper processing residues and clay of different sources for the production of porous anorthite ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt. 30(8), S. 1785-1793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.038>
- [11] Gupta N, Tripathi S, Balomajumder C. 2011. Characterization of pressmud: A sugar industry waste, *Fuel*, Cilt. 90, s. 389-394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.08.021>
- [12] Chauhan MK, Varun, Chaudhary S, Kumar S, Samar. 2011. Life cycle assessment of sugar industry: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 15(7), s. 3445-3453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.033>
- [13] Kaya VS, Sutcu M. 2020. Utilization of sugar processing filter cake instead of calcite in production of anorthite based ceramics, *Journal of Ceramic Processing Research*, Cilt. 21(4), s. 425-432. DOI: <http://doi.org/10.36410/jcpr.2020.21.4.425>
- [14] Hariharan V, Shanmugam M, Amutha K, Sivakumar G. 2014. Preparation and characterization of ceramic products using sugarcane bagasse ash waste, *Research Journal of Recent Sciences*, Cilt. 3 s. 67-70.
- [15] Souza AE, Teixeira SR, Santos GTA, Costa FB, Longo E. 2011. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials, *Journal of Environmental Management*, Cilt. 92, s. 2774-2780. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.020>
- [16] El-Maghraby HF, Aly AA, Naga SM. 2013. Utilization of Sugar-beet industry by-products for the production of anorthite, *Interceram*, Cilt. 62, s. 426-428.
- [17] Naga SM, Sayed M, Elmaghraby HF, Khalil MS, El-Sayed MA. 2017. Fabrication and properties of cordierite / anorthite composites, *Ceramics International*, Cilt. 43(8), s. 6024-6028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.142>
- [18] Naga SM, El-Maghraby HF, Aly AA. 2015. Preparation and Characterization of Anorthite-Alumina Composites, *Interceram-International Ceramic Review*, Cilt. 64(1-2), s. 34-37.
- [19] Kaya VS, Sutcu M, Yalamac E. 2022. Preparation and characterization of anorthite ceramics from sugar production solid waste: a statistical analysis of grinding parameters., *Journal of the Australian Ceramic Society*, Cilt. 58, s. 1025-1037. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00759-6>
- [20] Wu L, Li C, Li H, Wang H, Yu W, Chen K, Zhang X. 2020. Preparation and characteristics of porous anorthite ceramics with high porosity and high-temperature strength, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Cilt. 17(3), s. 963-973. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijac.13430>

- [21] Wu Q, W, Huang Z. 2021. Preparation and performance of lightweight porous ceramics using metallurgical steel slag, *Ceramics International*, Cilt. 47, s. 25169-25176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.302>
- [22] Torman Kayalar M, Erdoğan G, Yavaş A, Güler S, Sütçü M. 2022. Fabrication of porous anorthite ceramics using eggshell waste as a calcium source and expanded polystyrene granules. *Journal of Polytechnic*, Cilt. 25(3), s. 1235-1241. DOI: 10.2339/politeknik911758
- [23] Hoc Thang N. 2020. Novel Porous Refractory Synthesized from Diatomaceous Earth and Rice Husk Ash, *Journal of Polymer & Composites*, Cilt. 8(2), s. 128-137.



A Text Mining Application Using Weighted Majority Voting Ensemble Method

Ağırlıklı Çoğunluk Oylama Topluluğu Yöntemini Kullanan Bir Metin Madenciliği Uygulaması

Alican Doğan^{1*}, Mansur Alp Toçoğlu²

¹ Bandırma Onyedinci Eylül Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Balıkesir, TÜRKİYE

² İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: alicandogan@bandirma.edu.tr

Abstract

In text mining, sentiment analysis is gaining popularity day by day although it has been recently introduced. One of the important feedback parameters of this research is the opinion about text-based content. The general goal in this aspect is to analyze product and service reviews or comments so that they can be compared and contrasted with each other via the ratings they get. An ensemble method which we have proposed earlier is used in this study to boost the classification accuracy of different conventional single machine learning models. Five analytical models that are related but not identical are implemented and their class decisions are integrated using a special weighted majority voting ensemble mechanism called WMVE to increase the classification score of the data mining technique. Naïve Bayes, OneR, Hoefding Tree, REPTree, and KNN methods are utilized as base classifiers in the ensemble and their class decision are integrated into the WMVE method. At the same time, outputs were compared to the ones obtained by Standard Majority Voting Ensemble (MV) including the same base classifiers. Based on the findings, the WMVE model demonstrated superior performance compared to other classifiers, achieving an average accuracy of 77.35 and F-Score of 77.19 values. Consequently, the ensemble model including WMVE is used to enhance sentiment analysis classification performance.

Keywords: Majority voting, text mining, classification, ensemble

Öz

Metin madenciliğinde, yakın zamanda tanıtılmasına rağmen duygu analizi gün geçtikçe popülerlik kazanmaktadır. Bu araştırmanın önemli geri bildirim parametrelerinden biri, metin tabanlı bir içerik hakkındaki görüşlerdir. Bu konudaki genel amaç, ürün ve hizmet incelemelerini veya yorumlarını, aldıkları puanlar aracılığıyla birbirleriyle karşılaştırabilmeleri ve karşılaştırabilmeleri için analiz etmektir. Farklı geleneksel tek makine öğrenimi modellerinin sınıflandırma doğruluğunu artırmak için bu çalışmada daha önce önerdiğimiz bir topluluk yöntemi kullanılmıştır. Veri madenciliği tekniğinin sınıflandırma puanını artırmak için birbiriyle ilişkili ancak aynı olmayan beş analitik model uygulanmış ve bunların sınıf kararları, Ağırlıklı Çoğunluk Oylaması (WMVE) adı verilen özel ağırlıklı çoğunluk oylama topluluğu mekanizması kullanılarak entegre edilmiştir. Toplulukta temel sınıflandırıcılar olarak Naïve Bayes, OneR, Hoefding Tree, REPTree ve KNN yöntemleri kullanılmış ve bunların sınıf kararı WMVE yöntemi için entegre edilmiştir. Aynı zamanda sonuçlar aynı sınıflandırıcılarla oluşturulan Standart Çoğunluk Oylaması (MV) bulgularıyla da kıyaslanmıştır. Bulgulara göre, WMVE modeli, diğer sınıflandırıcılara kıyasla üstün performans sergiledi ve ortalama doğruluk değeri olarak 77.35 ve F-Skoru olarak 77.19 değerlerine ulaştı. Sonuç olarak, duygu analizi sınıflandırma doğruluğunu artırmak için ağırlıklı oylama yöntemini içeren topluluk modeli kullanılır.

Anahtar Kelimeler: Çoğunluk oylaması, metin madenciliği, sınıflandırma, topluluk

1. Introduction

The content created by users through information input is one of the most preferred accessible data used in the evaluation of a product or service. These contents are formed by users expressing their experiences about products or services in digital media. With the widespread use of web technologies, manufacturers, business owners, and sellers refer to their users' feedback data to gain a commercial advantage [1].

With the growth of online commerce and social networking sites, a significant amount of product or service evaluation data has been collected. In the referred community-based approach, the proposed method integrates supervised machine learning techniques with majority voting. The objective of this approach is

to optimize the decisions made by many classifiers to improve the classification quality. Voting is conducted among five classifiers: Naïve Bayes, ZeroR, BayesNet, Multinomial Text, and Logistic Regression. In these experiments, the majority voting community-based approach outperforms all individual classifiers and the standard majority voting [2].

Online opinions are generated for different purposes and have different side effects [3]. For example, a positive opinion can lead to financial growth, while a negative opinion can cause a decrease in sales. Therefore, sellers welcome the use of user opinions to improve their business. They analyze this feedback and adjust their products and services accordingly. Sentiment analysis constitutes a significant area of investigation in text mining,

natural language processing, and information retrieval. It serves the purpose of succinctly representing text documents, offering advantages in various applications such as automatic indexing, summarization, classification, clustering, and filtering. One specific application is in the domain of text classification, where the challenge of a high-dimensional feature space can be addressed by extracting the most crucial or relevant words from the document content and utilizing them as features.

Sentiment analysis is implemented in three levels. These levels are archive, sentence, and viewpoint level. In our study, we take care of sentences. Record-level organization determines whether the document's viewpoint is favorable, unfavorable, or impartial. The sentence level determines whether the sentence conveys a regrettable, positive, or neutral evaluation. The field of text classification presents a challenge due to the high-dimensional feature space [4].

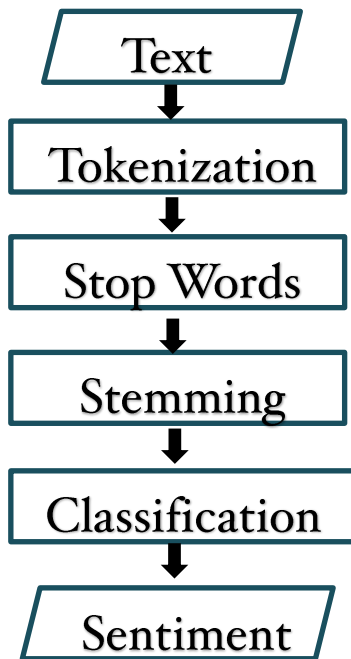


Figure 1. Sentiment analysis process.

Perspective level examines the entirety of the emotions expressed within the provided document and the perspective it refers to. Sentiment analysis process is demonstrated above in Figure 1.

The challenge of high-dimensional feature space is a common issue in text classification applications. Utilizing all words from training documents as features makes the text classification process computationally intensive. Therefore, selecting keywords from a text collection, representing the most crucial and relevant words in the document content, becomes a favorable choice for constructing features in a classification model. Machine learning algorithms like Naïve Bayes, k-nearest neighbor, support vector machines, and artificial neural networks have proven successful in text document classification. Ensemble methods, a collection of learning algorithms, combine decisions from these algorithms to build a more robust classification model with enhanced predictive performance.

2. Related Work

In the literature, there are studies focusing on analyzing the customer reviews obtained from Amazon in terms of categorizing the sentiments of them. Within the scope of this section, we briefly explain several studies related to sentiment analysis of

Amazon customer reviews. Text format eases the process of recording information but poses difficulties when attempting to utilize the data for secondary purposes [5].

In the study [6], the authors focused on the evaluation of sentiment analysis of balanced and unbalanced Amazon online review datasets. To do so, they used four well-known deep learning algorithms which are Recurrent Neural Network (RNN), Long Short-Term Memory (LSTM), Group Long Short-Term Memory (GLSTM), Gated Recurrent Unit (GRU) and Updated Recurrent Unit (URU). They utilized 3 different word embedding feature extraction methods which are Glove, Word2vec and FastText. The macro average prediction results were evaluated based on accuracy, recall, precision and F1-score. They achieved the highest accuracy result as 93.73 for the unbalanced dataset using GLSTM network with FastText feature extraction method. On the other hand, the LSTM networks provided the highest accuracy performance as 88.39 for the balanced dataset.

The authors analyzed sentiments of Amazon customer reviews in their study [7]. They used the Amazon Review dataset 2018 which consists of 938254 records from the accessories and cell phone section of Amazon in total. They compared the classification performances of two conventional machine learning classifiers (Naive Bayes and Support Classification Algorithm) with two deep learning classifiers (LSTM and Convolutional Neural Network(CNN)) in terms of accuracy, precision, recall and F1-score. According to the results, LSTM provided the highest performance among other classifiers with 93% accuracy and 97% F1-score values.

In another study [8], the sentiment polarization of the Amazon product reviews had been analyzed by using two conventional machine learning classifiers which are Naive Bayes (NB) and Support Vector Machine (SVM) in terms of four metrics (accuracy, recall, precision and F1-score). The authors used a raw dataset which is composed of more than one million Amazon product feedbacks. The dataset is automatically labeled according to 5-star rating system. Considering the classification results, SVM outperformed NB in terms of all metrics.

Khalid et al. [9] proposed a voting classifier named Gradient Boosted Support Vector Machine (GBSVM) based on two base models which are Gradient Boosting and Support Vector Machine. They utilized a dataset containing 64,295 records which are the mobile application reviews for Google apps. In the experimental section of the study, the authors focused on investigating prediction performances of various machine learning classifiers (Support Vector Machine, Gradient Boosting Machine, Logistic Regression and Random Forest), the proposed voting classifier and four state-of-the-art ensemble methods. The outcome of the results indicated that the proposed model outperformed other classifiers.

Qorich and Ouazzani [10] focused on extracting positive and negative sentiments of Amazon customer reviews within the scope of their study. To do so, they proposed a CNN model and compared its performance with baseline machine learning and deep learning classifiers in terms of accuracy, precision, recall and F1-score. They also implemented experiments by using diverse model designs. The overall results indicated that the proposed CNN model achieved higher performance as 90% accuracy value among other classifiers.

In the study [11], the authors performed an aspect level sentiment analysis considering bipolar words on Amazon product reviews. To do so, they first used Scrapy to collect the raw dataset which is composed of 191,720 reviews of six different products and then they performed four stages to

preprocess the data. Next, the authors identified the bipolar words with their adjustment values using aspect level sentiment analysis. After the identification of bipolar words, the classification phase is performed by using the support vector machine classifier with its three different kernels which are linear, polynomial and radial basis function (RBF). According to the classification performances, RBF provided the best results among others.

Alroobaea [12] studied sentiment analysis on Arabic Amazon product reviews using deep learning architectures. The author used three different datasets with different sizes. After the pre-processing phase, a recurrent neural network (RNN) model was applied to predict reviews in terms of positive and negative sentiments. The results obtained by the proposed RNN model were compared to three well-known deep learning architectures which are Long short-term memory (LSTM), Gated Recurrent Unit (GRU), and Convolutional Neural Network (CNN). According

to the overall prediction results, the proposed model achieved the highest accuracy values in all three datasets.

3. Materials and Method

The main objective of the research is to propose a novel ensemble method with a special weighted majority voting mechanism to improve the predictive performances achieved in a sentiment analysis problem. The overall view of the proposed method is revealed in Figure 2.

As shown in Figure 2 [13], the first stage of the proposed framework is selecting single classification algorithms. In our study, we have chosen 5 different classifiers. This number can be increased or decreased according to the problem. The algorithm assigns distinct weights to each trained classifier based on how well they perform on the validation set. The ultimate prediction for each instance is determined by considering the votes of the classifiers with the highest weights [13].

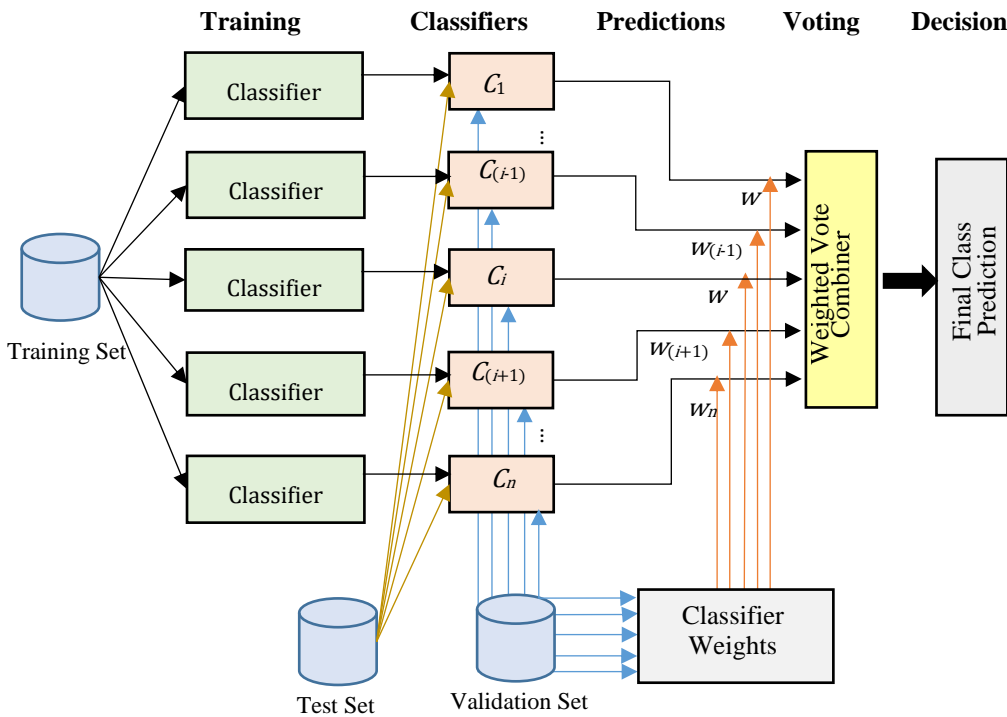


Figure 2. The structure of the proposed method

The next phase of the proposed method is to determine the weights of each classifier. In this step, all objects in the validation dataset are traversed and processed through n classifiers once. Then, the weights of the classification methods having correct predictions are increased by the ratio of the number of incorrectly predicting classifiers to the whole number of classifiers (n). The output of this step is the classifiers with updated weights to vote decision of class label of each instance in the test test.

Different text mining preprocessing steps such as normalization, tf-idf transformation, bag-of-words, removing stop words etc. are implemented on the training set. This weight gain value cannot exceed 1 for a single instance operation. Those preprocessing operations have been performed using python machine learning libraries and Weka [16] filtering tools. Following the implementation of these preprocessing procedures, the result is subsequently directed to the subsequent phase, known as the classification stage.

In the WMVE approach that is being suggested, there consist of three distinct stages. The initial stage involves training classifiers using a training set. Subsequently, the second stage involves ascertaining the weights of these classifiers by utilizing a validation set. During this phase, each classifier produces a decision pertaining to the predicted class label of a single instance, and these decisions are assessed to adjust the weights. Lastly, in the third stage, the outputs from individual classifiers are amalgamated, taking into account their respective weights.

Therefore, the complete dataset is divided into three distinct parts: the training set, the validation set, and the test set. The validation set's size matches that of the test set, amounting to one-eleventh of the entire dataset. Let's denote "m" as the number of instances within the validation set. Table 1 provides a visual representation of the classifiers' accurate and inaccurate predictions for each instance in the validation set, where

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } j^{th} \text{ classifier makes a correct} \\ & \text{prediction for } i^{th} \text{ instance} \\ 0, & \text{if } j^{th} \text{ classifier makes an incorrect} \\ & \text{prediction for } i^{th} \text{ instance} \end{cases}$$

Table 1. Predictions of classifiers in the validation set.

Instances	C1	C2	...	C _n
1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1n}
2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2n}
.
m	p_{m1}	p_{m2}	...	p_{mn}

In the classification stage, five different single classifiers, normal majority voting ensemble, and the proposed weighted majority voting ensemble methods consisting of these five classifiers are implemented. These classifiers are OneR, Hoefding Tree, REPTree, k-NN, and Naive Bayes methods. All models were applied using C# code snippets and related Weka classification libraries.

4. Experimental Results

In this study, we used a pre-collected dataset from Kaggle which is composed of 10 columns and 568,454 rows in total. The dataset contains customer reviews of fine foods from Amazon [14]. We made several changes on the dataset to make it ready for the tasks implemented in this paper. Firstly, we separated the review and the score columns and created a sub-dataset. Next, we redefined the rating values as negative and positive within the score column where the value range is between 1 to 5 indicating 1 as the lowest rating value and 5 as the highest rating value. We set 1 and 2 rating values as negative (0) and 5 as positive (1). After the labeling process, the sentiment distribution of the dataset became 363,122 positive and 82,037 negative reviews. However, we shrunk the dataset to 4,938 positive and 4,703 negative reviews due to the calculation problems of the proposed methods in this study. Table 2 shows several customer review examples with their label.

After the re-construction of the dataset, we applied pre-processing methods on the dataset to make it ready to be used in experimental procedures. First, we converted all characters to lowercase. Second, we removed punctuation characters, the extra spaces, and all numeric characters. Then, we normalized each term in the dataset by using SnowballStemmer. At last, we removed all stopwords defined within the version 3.7 NLTK library [15].

In this phase of the study, we compared the macro average predictive performances of the proposed model WMVE with six different machine learning classifiers (OneR, HT, REPTree, NB, KNN and MV) in conjunction with four different stemming approaches (namely, Snowball, IL, Lovins and None). We achieved all experimental results by using TF-IDF text representation scheme. Five different ngram models have been evaluated ranging from 1 to 3. In addition, we considered the combination of ngram models which are unigram-bigram(uni-bi), bigram-trigram(bi-tri), and unigram-bigram-trigram(uni-bi-tri). In the empirical analysis, we set the feature size as 1,000 and utilized 10-fold cross validation where the dataset is divided into three parts in each fold which are training(9/11), testing(1/11) and validation(1/11).

We implemented a C# program to perform all the empirical analysis. We have utilized Weka machine learning library suitable for visual studio environment to figure out classification tasks. We have used default input parameters for each classifier. The application enable us to compare and contrast classification performance values obtained by single classifiers and ensemble models.

Tables 3,4,5,6 show the accuracy, precision, recall and F-score values achieved for all cases in the empirical analysis. Among all the compared configurations in terms of all four metrics, similar combinations provided the highest and the lowest scores. The proposed model WMVE using the None stemming approach in conjunction with the uni-bi-tri n-gram combination have achieved the highest predictive performances for all metrics. In contrast, the lowest predictive performances have been achieved by the classifier OneR using the Snowball stemming approach in conjunction with the bigram and bi-trim n-gram combinations.

Table 2. Customer review samples.

Customer Review	Label
I love these chips and they are so much healthier than regular chips and they taste great and they look unique	1
found this tea while living in seattle a few years ago absolutely my favorite	1
people who spend this kind of money on belgian chocolate will likely never be able to afford a vacation in belgium	0
unfortunately this is a very poor representation of jack links beef jerky the bags are small and the jerky is in very small pieces and crumbs it looks like scraps or left overs no piece is larger than inch	0
this is great i have bought it for years and it is always good nothing better with a morning cup of coffee	1
this coffee tastes like any other i highly doubt it is even jamacain blue mountain since it doesnt have that distinct taste save your money	0
my son is a chef in the making and this will be a great addition to his ingredients list he will enjoy this	1

Table 3. Accuracy values of seven classifiers for all cases.

	OneR	HT	REPTree	NB	KNN	MV	WMVE
Snowball_unigram	60.41	60.07	68.67	55.49	54.18	63.96	64.83
Snowball_(uni-bi)	60.43	70.36	68.1	54.7	53.39	69.15	69.09
Snowball_(uni-bi-tri)	60.62	69.81	68.91	54.61	53.9	69.79	69.77
Snowball_bigram	50.28	64	67.54	54.08	49.87	64.21	68.03
Snowball_(bi-tri)	50.23	68.17	68.87	52.79	51.77	64.34	68.23
IL_unigram	59.67	66.64	76.59	73.2	62.18	76.16	80.26
IL_(uni-bi)	59.19	65.89	75.97	73.95	61.89	77.46	81.95
IL_(uni-bi-tri)	59.92	64.42	75.93	74.27	61.7	77.22	80.99
IL_bigram	59.85	64.96	75.25	74.38	61.04	76.81	81.31
IL_(bi-tri)	59.57	64.25	75.38	73.93	61.35	77.22	81.16
Lovins_unigram	61.76	64.79	78.62	70.05	64.55	72.27	79.27
Lovins_(uni-bi)	62.98	63.48	77.12	70.79	64.78	72.86	79.44
Lovins_(uni-bi-tri)	60.64	64.74	78.03	71.35	63.87	72.19	77.38
Lovins_bigram	60.39	62.78	78.08	72.63	62.88	72.95	78.99
Lovins_(bi-tri)	60.9	62.67	76.48	71.05	64.25	73.54	76.79
None_unigram	68.19	69.47	77.14	73.98	59.86	75.59	80.99
None_(uni-bi)	66.77	69.07	74.66	71.45	62.62	74.19	80.25
None_(uni-bi-tri)	66.57	70.45	75.92	75.16	62.26	76.94	83.68
None_bigram	64.57	71.51	77.89	75.45	60.13	73.21	82.57
None_(bi-tri)	64.22	67.9	73.2	73.9	58.04	75.82	82.04

Table 4. Precision values of seven classifiers for all cases.

	OneR	HT	REPTree	NB	KNN	MV	WMVE
Snowball_unigram	60.88	58.79	70.1	55.66	55.97	64.59	63.77
Snowball_(uni-bi)	62.2	72.21	69.36	52.74	51.59	67.99	68.11
Snowball_(uni-bi-tri)	60.06	68.37	70.69	53.76	54.06	71.05	70.41
Snowball_bigram	48.89	62.23	66.07	55.04	51.53	63.18	67.71
Snowball_(bi-tri)	49.86	68.04	69	54.69	53.25	63.99	66.99
IL_unigram	58.5	66.29	75.65	74.38	62.2	77.19	78.63
IL_(uni-bi)	60.19	67.64	77.95	74.48	61.26	76.27	80.98
IL_(uni-bi-tri)	60	66.33	76.68	76.23	63.55	75.49	79.32
IL_bigram	61.28	66.74	74.74	76.35	61.01	76.2	80.24
IL_(bi-tri)	57.76	66.04	75.53	72.11	62.12	77.48	79.41
Lovins_unigram	62.26	65.57	77.46	69.71	65.17	72.59	80.19
Lovins_(uni-bi)	63.02	61.48	76.98	70.46	64.08	71.87	78.75

Lovins_(uni-bi-tri)	62.06	65.27	76.24	72.42	63.56	73.37	79.06
Lovins_bigram	61.93	60.99	76.91	73.1	63.56	73.37	79.62
Lovins_(bi-tri)	59.32	63.93	76.82	70.47	62.33	72.01	75.58
None_unigram	69.38	68.14	76.83	75.26	61.05	75.01	80.8
None_(uni-bi)	66.98	69.52	73.29	71.79	60.92	73.73	81.68
None_(uni-bi-tri)	68.48	71.01	75.99	75.28	61.06	75.27	84.11
None_bigram	65.06	73.03	79.88	73.58	58.15	74.17	82.59
None_(bi-tri)	64.13	68.7	71.79	74.84	56.34	75.01	83.85

Table 5. Recall values of seven classifiers for all cases.

	OneR	HT	REPTree	NB	KNN	MV	WMVE
Snowball_unigram	60.03	58.62	70.42	56.41	55.23	65.97	62.98
Snowball_(uni-bi)	62.57	71.2	68.01	52.46	51.8	67.07	67.53
Snowball_(uni-bi-tri)	60.79	68.88	69.72	54.62	54.98	72.42	70.96
Snowball_bigram	47.95	62.46	65.51	55.19	52.36	64.45	68.79
Snowball_(bi-tri)	50.87	69.19	68.14	55.52	53.77	63.62	66.98
IL_unigram	58.75	65.1	75	73.34	61.07	76.04	79.99
IL_(uni-bi)	61.33	67.04	77.34	75.91	62.73	77.74	79.92
IL_(uni-bi-tri)	60.24	65.62	77.53	76.97	62.08	75.99	79.9
IL_bigram	61.83	67.65	74.7	74.86	60.14	75.59	81.13
IL_(bi-tri)	56.87	65.99	74.33	70.94	62.22	77.03	80.76
Lovins_unigram	62.95	64.12	78.82	69.81	66.4	71.46	79.57
Lovins_(uni-bi)	62.87	62.37	76.26	69.1	63.33	70.98	77.94
Lovins_(uni-bi-tri)	60.66	64.18	76.35	73.25	64.62	72.58	78.7
Lovins_bigram	61.55	61.64	77.62	73.94	64.75	74.51	78.65
Lovins_(bi-tri)	60.07	64.66	77.3	70.48	60.95	71.59	76.16
None_unigram	68.56	69.3	77.29	75.2	62.09	73.67	81.51
None_(uni-bi)	67.79	70.99	72.28	71.96	61.7	72.68	83.15
None_(uni-bi-tri)	67.53	71.81	76.17	74.29	61.39	74.82	84.96
None_bigram	65.44	71.8	78.93	74.98	59.09	73.15	83.08
None_(bi-tri)	63.44	70.13	72.94	76.18	56.64	76.03	83.39

Table 6. F-score values of seven classifiers for all cases.

	OneR	HT	REPTree	NB	KNN	MV	WMVE
Snowball_unigram	60.45	58.70	70.26	56.03	55.60	65.27	63.37
Snowball_(uni-bi)	62.38	71.70	68.68	52.60	51.69	67.53	67.82
Snowball_(uni-bi-tri)	60.42	68.62	70.20	54.19	54.52	71.73	70.68

Snowball_bigram	48.42	62.34	65.79	55.11	51.94	63.81	68.25
Snowball_(bi-tri)	50.36	68.61	68.57	55.10	53.51	63.80	66.98
IL_unigram	58.62	65.69	75.32	73.86	61.63	76.61	79.30
IL_(uni-bi)	60.75	67.34	77.64	75.19	61.99	77.00	80.45
IL_(uni-bi-tri)	60.12	65.97	77.10	76.60	62.81	75.74	79.61
IL_bigram	61.55	67.19	74.72	75.60	60.57	75.89	80.68
IL_(bi-tri)	57.31	66.01	74.93	71.52	62.17	77.25	80.08
Lovins_unigram	62.60	64.84	78.13	69.76	65.78	72.02	79.88
Lovins_(uni-bi)	62.94	61.92	76.62	69.77	63.70	71.42	78.34
Lovins_(uni-bi-tri)	61.35	64.72	76.29	72.83	64.09	72.97	78.88
Lovins_bigram	61.74	61.31	77.26	73.52	64.15	73.94	79.13
Lovins_(bi-tri)	59.69	64.29	77.06	70.47	61.63	71.80	75.87
None_unigram	68.97	68.72	77.06	75.23	61.57	74.33	81.15
None_(uni-bi)	67.38	70.25	72.78	71.87	61.31	73.20	82.41
None_(uni-bi-tri)	68.00	71.41	76.08	74.78	61.22	75.04	84.53
None_bigram	65.25	72.41	79.40	74.27	58.62	73.66	82.83
None_(bi-tri)	63.78	69.41	72.36	75.50	56.49	75.52	83.62

Figure 3 depicts the overall average predictive performances of the seven classifiers based on four different stemming approaches in terms of accuracy and F-score. The classifiers using the None (raw data) stemming approach achieved the highest average accuracy and F-score values of 71.88 and 72.01

respectively, compared to other approaches. On the other hand, while LOVINS and IL stemmers performed similar results, the lowest average accuracy and F-score values of 61.79 and 61.86 respectively, have been achieved by the classifiers when the dataset stemmed by using the Snowball stemmer.

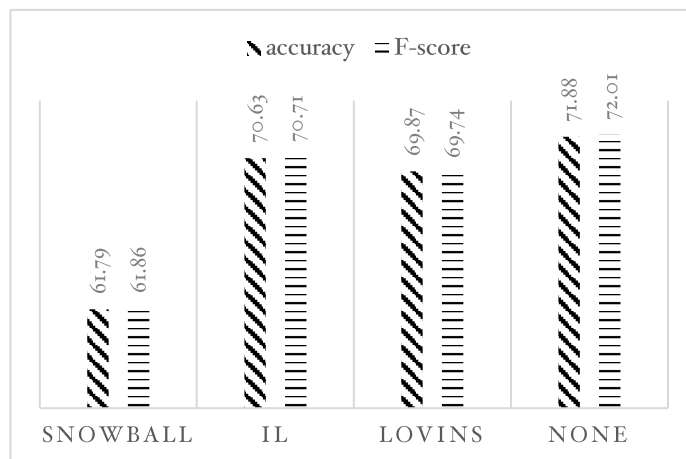


Figure 3. Average values of all cases based on four stemming approaches in terms of accuracy and F-score metrics.

Figure 4 displays the overall average accuracy and F-score values achieved by the classifiers when the three different ngram models (namely, unigram, bigram, trigram) and their combinations have been used to extract features. As it can be observed from the empirical results, the highest performances have been obtained by using all the three models together (uni-bi-tri) with the average accuracy and F-score values of 69.32 and

69.66, respectively. The second highest performances have been achieved by the combination of unigram and bigram models (uni-bi) with the results of 69 and 68.81. In contrast, the lowest accuracy and F-score values of 67.79 and 67.63 respectively, have been obtained by using the combination of bigram and trigram models (bi,tri).

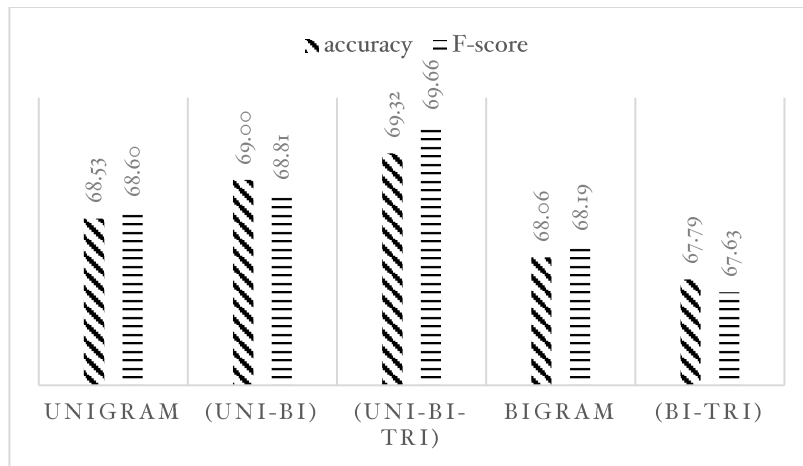


Figure 4. Average values of all cases based on five different ngram models in terms of accuracy and F-score metrics.

Figure 5 depicts the comparison of average predictive performances of the proposed classifier WMVE with six different machine learning algorithms in terms of accuracy and F-score values which are obtained from all cases within the empirical analysis. According to the results where accuracy and F-score values are slightly similar, the WMVE model outperformed other

classifiers with an average accuracy value of 77.35. The second highest prediction performance has been achieved by REPTree with the accuracy value of 74.42. The third highest average accuracy value, which is 72.79, obtained by MV classifier. In contrast, KNN performed the lowest performance among all other classifiers.

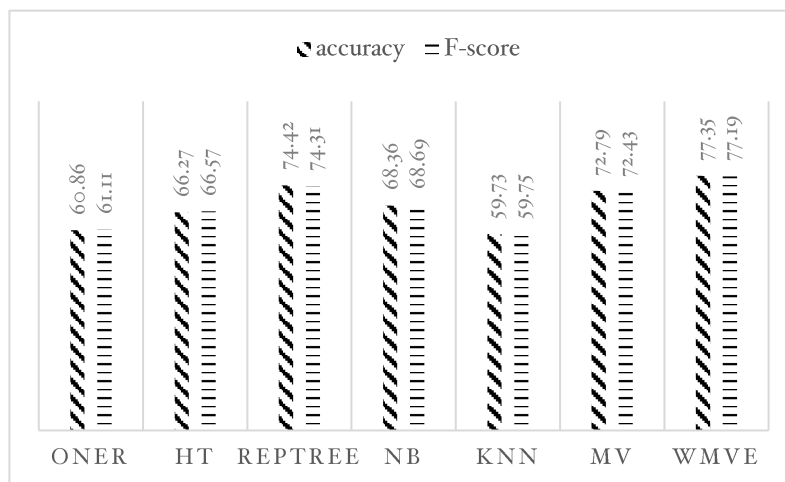


Figure 5. Average values of the classifiers in terms of accuracy and F-score metrics.

5. Discussion and Conclusion

In this paper, we presented a comprehensive sentiment analysis on Amazon customer reviews by proposing a novel weighted majority voting ensemble method utilizing five base classifiers which are Naïve Bayes, OneR, Hoefding Tree, REPTree, and KNN. We used a pre-collected Kaggle dataset which is composed of 9,641 reviews. In the empirical analysis phase, we compared the predictive performances in terms of accuracy, precision, recall and F-score metrics of WMVE and the six different machine learning classifiers (OneR, HT, REPTree, NB, KNN and MV) in conjunction with five ngram models (unigram, bigram, uni-bi, bi-tri, and uni-bi-tri). In addition, we evaluated the results of four various stemming approaches (namely, Snowball, IL, Lovins and None).

Regarding the overall predictive performances, the proposed model WMVE outperformed other classifiers by achieving the highest average accuracy and F-score values of 77.35 and 77.19 respectively. Besides, the empirical results show that the combination of three ngram models (uni-bi-tri) performed

higher accurate performances compared to other ngram combinations. According to the results obtained by using different stemming approaches, we observed that using the raw dataset provided higher results compared the other stemming approaches.

It is clear that the proposed ensemble method with a special weighted majority voting mechanism performed higher scores compared to normal majority voting method and five different base classifiers. This paper's primary contributions can be succinctly outlined as follows: (i) it initiates with a concise overview of weighted majority voting methods, introduced to enhance the predictive performance of conventional ensemble learning approaches; (ii) it introduces a novel Weighted Majority Voting Ensemble (WMVE) that takes into account amplifying the impact of models correctly predicting outcomes based on the failure rate of other models; (iii) it showcases various experimental studies conducted on twenty-eight benchmark datasets, demonstrating that the proposed WMVE method generally yields superior classification outcomes compared to both the simple majority voting ensemble (MV) approach and

individual standard classification algorithms in terms of accuracy, precision, recall, and F-score. The classification algorithms employed in the experimental analysis include the REP decision tree, Hoefding Tree (HT), k-nearest neighbor (KNN), OneR, and naive Bayes (NB). These algorithms were chosen for their widespread popularity in this research.

For future work, we plan to use deep learning architectures (RNN, LSTM and CNN) as the base classifiers of the proposed ensemble model and compare the proposed model with transformer architectures such as Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) language model.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

Ethics committee approval is not required for the prepared article.

There is no conflict of interest with any individual or institution in the prepared article

Author Contributions

Author 1 developed the classification method and conducted the experiments while author 2 completed necessary preprocessing operations on datasets and figured out an extensive literature review on text mining discipline. All of the authors contributed to the writing process of this manuscript.

References

- [1] Basiri, E., Safarian, N., Farsani, E. 2019. A supervised framework for review spam detection in the Persian language, In: 2019 5th International Conference on Web Research (ICWR), 24-25 April, Tahrán, Iran, 203-207.
- [2] Juyal, P. 2022. Classification accuracy in sentiment analysis using hybrid and ensemble methods. 2022 IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing (AIC), 17-19 June, Sonbhadra, India, 583-587.
- [3] Raза, N., Bharti, S., Ritika, M. 2023. Detecting the risk of Covid 19 Spread in near real-time using social media. International Journal of Emergency Management, vol. 18(2), 202-223. <https://doi.org/10.1504/IJEM.2023.131940>.
- [4] Nona, N., Julien, K., Jenny, C., Patrick, R., Douglas, T. 2021. Ensemble of deep masked language models for effective named entity recognition in health and life science corpora, vol. 6, 689803. doi: 10.3389/frma.2021.689803
- [5] McAuley, J., Leskovec, J. 2013. From amateurs to connoisseurs: Modeling the evolution of user expertise through online reviews, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1303.4402>
- [6] Alharbi, N.M., Alghamdi, N.S., Alkhamash, E.H., Al Amri, J.F. 2021. Evaluation of sentiment analysis via word embedding and RNN variants for Amazon online reviews, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2021, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/5536560>
- [7] Gondhi, N.K., Sharma, E., Alharbi, A.H., Verma, R., Shah, M.A. 2022, Efficient long short-term memory-based sentiment analysis of e-commerce reviews, Computational Intelligence and Neuroscience, vol. 2022,3464524. <https://doi.org/10.1155/2022/3464524>
- [8] Dey, S., Wasif, S., Tonmoy, DS., Sultana, S., Sarkar, J., Dey, M. 2020. A comparative study of support vector machine and Naive Bayes classifier for sentiment analysis on Amazon product reviews, In: 2020 International Conference on Contemporary Computing and Applications, 05-07 February, Lucknow, India, 217-220.
- [9] Khalid, M., Ashraf, I., Mehmood, A., Ullah, S., Ahmad M., Choi, GS. 2020, GBsvm: sentiment classification from unstructured reviews using ensemble classifier, Applied Sciences, vol. 10(8), 2788. <https://doi.org/10.3390/app10082788>
- [10] Qorich, M., El Ouazzani, R. 2023, Text sentiment classification of Amazon reviews using word embeddings and convolutional neural networks, The Journal of Supercomputing, vol. 79, 11029-11054. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05094-6>
- [11] Nandal, N., Tanwar, R., Pruthi, J. 2020, Machine learning based aspect level sentiment analysis for Amazon products, Spatial Information Research, vol. 28(5), 601-607. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00320-2>
- [12] Alroobaea, R. 2022 Sentiment analysis on amazon product reviews using the recurrent neural network (rnn), International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 13(4), 5536560. <https://doi.org/10.1155/2021/5536560>
- [13] Dogan, A., Birant, D. 2019. A weighted majority voting ensemble approach for classification. 2019 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), 11-15 September, Samsun, Turkey, 1-6. doi: 10.1109/UBMK.2019.8907028
- [14] Onan, A., Korukoglu, S., Bulut, H. 2016. Ensemble of keyword extraction methods and classifiers in text classification. Expert Systems with Applications, vol. 57, 232-247. Doi: 10.1016/j.eswa.2016.03.045
- [15] Bird, S., Loper, E. 2016. The natural language toolkit NLTK: The natural language toolkit, In: Workshop on Effective Tools and Methodologies for Teaching Natural Language Processing and Computational Linguistics, March, 63-70.
- [16] Frank, E., Hall, M.A., Witten, I.H. 2016. The WEKA Workbench. Online Appendix for "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques", Morgan Kaufmann, Fourth Edition.



Altı Serbestlik Dereceli Robot Manipülâtörün Ters Kinematik Analizi İçin Gko Ve Çdde Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi

Comparative Analysis of Gwo and Mtde Algorithms for Inverse Kinematic Analysis of Six Dof Robot Manipulator

Gökçe Sena Hocaoğlu ¹, Nazlıcan Çavli ², Emrah Benli ^{3*}

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: emrahbenli@ktu.edu.tr

Öz

Robot manipülâtörlerinin eklem sayıları artmasıyla veya geometrik yapılarından kaynaklı manipülâtörün ters kinematik analizinin yapılması zorlaşır. Bu durumda akıllı algoritmalara başvurulur. Bu çalışmada altı serbestlik derecesine (SD) sahip Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipülâtörün ters kinematik analizi Gri Kurt Optimizasyon (GKO) algoritması ve Çoklu Denemeli Diferansiyel Evrim (ÇDDE) algoritması kullanılarak yapılmıştır. İlk adım için 3 adet senaryo tasarlanarak bu senaryolara ait hedeflenen konum değerleri belirlenmiştir. Ardından MATLAB üzerinde, çalışmada kullanılan robot manipülâtörünün kinematiği matematiksel olarak modellenmiştir. Manipülâtörün uç-efektörünün hedeflenen konuma gelmesini sağlamak için gerekli eksen açıları akıllı algoritmalar ile bulunmuştur. Geleneksel ve Geliştirilmiş GKO algoritmasıyla elde edilen sonuçlar ÇDDE algoritmasıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonucu alınan veriler değerlendirildiğinde ÇDDE algoritmasının çok daha hızlı eklem açısı değerlerini verdiği sonucuna varılmıştır. Optimizasyon algoritmaları ile yapılan ters kinematik analizi için literatür taraması yapıldığında ÇDDE algoritmasının kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışma, ÇDDE algoritmasını kullanarak optimizasyonla ters kinematik analizinde literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gri kurt optimizasyonu, çoklu denemeli diferansiyel evrim, ters kinematik analizi, robot manipülâtör

Abstract

With the increase in the number of joints of robot manipulators or due to their geometric structures, inverse kinematic analysis of the manipulator becomes difficult. In this case, intelligent algorithms are used. In this study, inverse kinematic analysis of the six-degrees-of-freedom (DOF) Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipulator was performed using Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm and Multi-trial Vector-based Differential Evolution (MTDE) algorithm. The initial step involved designing three scenarios and determining their respective targeted position values. Subsequently, the mathematical modelling of the robot manipulator used in the study was conducted on MATLAB. Intelligent algorithms were employed to determine the axis angles necessary to ensure that the manipulator's end-effector reaches the targeted position. The results obtained with the traditional and improved GWO algorithm were compared with the results obtained with the MTDE algorithm. When the data obtained as a result of the optimization were evaluated, it has been observed that the MTDE algorithm gave much faster joint angle values. When the literature was searched for the inverse kinematics analysis made with optimization algorithms, no study was found in which the MTDE algorithm was used. The study aims to contribute to the literature in inverse kinematics analysis with optimization using the MTDE algorithm.

Keywords: Grey wolf optimization, multi-trial vector-based differential evolution, inverse kinematic analysis, robot manipulator

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In this study, the inverse kinematic analysis of Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipulator is performed using meta-heuristic algorithms such as Traditional Grey Wolf, Improved Grey Wolf and Multi-trial Vector-based Differential Evolution algorithms. Three different position values of the end effector were given to the system and the joint angles were calculated using metaheuristic optimization algorithms. The results were then checked by replacing the obtained angle values in the forward kinematic equation and the error value was calculated.

Materials and Methods

In this study, the inverse kinematic analysis of the Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipulator was performed. The inverse kinematics problem is difficult and complex to solve by numerical methods. Therefore, traditional grey wolf optimization, improved grey wolf optimization and multi-trial vector-based differential evolution optimization algorithms are used for the inverse kinematic analysis. The position of the end effector is given and joint angles suitable for the position are obtained using optimization algorithms.

Results and Discussion

This study performs the inverse kinematic analysis of the robot manipulator using traditional grey wolf optimization, improved grey wolf optimization and multi-trial vector-based differential evolution optimization algorithms. When the results are compared, it is observed that the traditional GWO algorithm for low iteration number and the MTDE algorithm for high iteration

number achieve the result with less error. In both cases, the MTDE algorithm reached the result faster.

Conclusion

Inverse kinematics analysis is a challenging problem. In this study, inverse kinematic analysis of a robot manipulator was successfully performed with very small errors using metaheuristic algorithms

1. Giriş

Manipülörler, robotik alanında önemli bir yere sahiptir ve manipülörler üzerine yapılan araştırmalar gün geçtikçe artmakta, bu alandaki teknoloji gelişmektedir. Manipülörlerin ters kinematik analizi, manipülör tasarımında ve kontrolünde önemli bir yere sahiptir. Ters kinematik analizi, manipülörün hareket analizinin ve yörünge planlamasının yapılmasında önemlidir. Manipülörün ters kinematik analizi yapılarak konumu ve duruş pozunu bilinen robotun sahip olduğu tüm eklem açıları bulunur. Ters kinematik çözümü analitik ve sayısal olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Analitik çözüm yöntemi de kendi içinde cebirsel yöntem ve geometrik yöntem olmak üzere ikiye ayrılır [1]. Geometrik yapısı gereği veya montaj sırasında meydana gelen hatalardan dolayı bazı robotların ters kinematik analizini yapmak analitik çözüm yöntemleri ile zorlu ve karmaşıktır. Bu noktada akıllı algoritmalar kullanılabilir. Son yıllarda robotların herhangi bir pozisyonda ters kinematik analizini yapmak için yaygın olarak akıllı algoritmalar kullanılmaktadır [2].

Alkayyali ve Tutunji yaptıkları çalışma ile 6 serbest dereceli eklem sahip KUKA robot manipülörün kinematik analizini Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritmasını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. PSO algoritmasının atalet ağırlığını ve daralma katsayısını yeniden formüle etmişlerdir. Sonuç olarak küçük bir hata yüzdesiyle robot manipülörün duruş pozuna göre 6 eklem açılarını hesaplamışlardır [3].

Yiyang ve arkadaşları 6 serbest dereceli eklem sahip Comau NJ-220 robot manipülörün kinematik analizini Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) tabanlı algoritmayı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sabit değer olarak alınan atalet ağırlığını benzerlik faktörüne bağlı doğrusal olmayacak şekilde yeniden formüle etmişlerdir. Buna ek olarak göç operatörünü algoritmaya dahil etmişler ve orijinal PSO'ya göre daha iyi sonuç aldıklarını görmüşlerdir [2].

Dereli ve Köker çalışmalarında 7 serbest dereceli eklem sahip robot manipülörü için Ateş Böceği algoritmasını kullanarak ters kinematik hesaplaması sunmuşlardır. Öncelikle D-H parametreleri kullanılarak konum denklemleri elde edilmiştir. Ardından manipülörü, hesaplanan konuma getirilebilmesi için gereken açı değerlerine Ateş Böceği Optimizasyon algoritması kullanılarak ulaşılmıştır. Sonuç olarak Ateş Böceği algoritmasının diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırıldığında 10 kat ile 10000 kat arasında daha iyi çözümler ürettiği ve daha kısa sürede çözüme ulaştığı görülmüştür [4].

Çift yönlü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ile mobil robotun ters kinematikiğini hesaplanması üzerine yapılan bir çalışmada [5] çarpışma algılama ve engellerden kaçınma kısıtları üzerinde durulmuştur. Ters kinematik hesabı yapılırken manipülör ayırma tekniği kullanılmıştır. 4 farklı topoloji denenmiş en iyi sonuç manipülörün ortadan ayrıldığı topolojide elde edilmiştir.

7 serbest dereceli eklem sahip robotun ters kinematik çözümü üzerine yapılan çalışmada [6] geleneksel PSO ve atalet ağırlığının

değiştirildiği iki farklı tür PSO algoritması kullanılmıştır. Çalışma sonucunda atalet ağırlığı global en iyi sonuç için düzenlenen PSO algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha az hata ile hedeflenen pozisyona ulaştığı görülmüştür.

Marić ve arkadaşları çalışmalarında Riemannian optimizasyonunu kullanarak mesafe tabanlı ters kinematik problemi çözümü sunmuştur. Önerilen yöntem çeşitli görev kısıtları altında büyük bir robot grubuna uygulanmış ve geleneksel yöntemlere göre daha yüksek başarı oranına ulaştığı görülmüştür. Ayrıca önerilen yöntem çoklu çalışma alanı kısıtı içeren problemlerle karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermiştir [7].

Dereli 7 serbest dereceli eklem sahip robotun ters kinematik çözümünü Geliştirilmiş Gri Kurt Optimizasyon algoritması kullanarak çözmüştür. Önerilen GKO algoritmasında yakınsama katsayısı değiştirilerek sonuçların yerel optimum değerlere takılmadan daha hızlı bir şekilde en iyi sonuca yakınsaması amaçlanmıştır. Geleneksel GKO ve diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırıldığında önerilen optimizasyon algoritmasının çok daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir [8].

Amiri ve Ramli Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonunun (PSO) kombinasyonu olan Genetik Sürü Optimizasyonunu (GSO) kullanarak 5 serbest dereceli eklem sahip bir robotun ters kinematik analizini yapmıştır. Bu çalışmada her bir eklem ayrı ayrı Orantılı-İntegral-Türev (PID) denetleyicilerle kontrol edilmiş ve PID parametreleri GSO algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda GSO algoritmasının GA ve PSO algoritmalarına göre yaklaşık olarak %20 daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir [9].

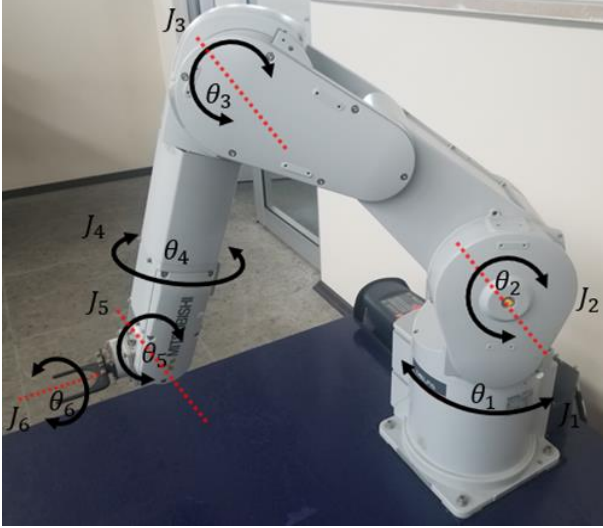
Literatüre bakıldığında ters kinematik problemin çözümü için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının sıkça kullanıldığı görülmektedir. Fakat yine literatür taraması yapıldığında, sezgisel algoritmaların ters kinematik analizi sistemleri için karşılaştırmalı analiz çalışmalarına yer verildiği pek görülmemiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan Geleneksel ve Geliştirilmiş GKO algoritmaları ile de yapılmış çalışmalar [8] bulunmaktadır. Fakat literatürde ÇDDE algoritmasının ters kinematik probleminin çözümünde kullanılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada 6 serbest dereceli eklem sahip Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipülörün ters kinematik analizi için Geleneksel GKO, Geliştirilmiş GKO ve ÇDDE algoritmaları kullanılacaktır. Bölüm 2'de ters kinematik analiz ve Mitsubishi Melfa RV-7FL-D manipülörün D-H parametreleri verilmiştir. Bölüm 3'te GKO algoritması ve Geliştirilmiş GKO algoritması, Bölüm 4'te ise ÇDDE algoritmaları açıklanmıştır. Simülasyon çalışması ve elde edilen sonuçlar Bölüm 5'te ele alınmış ve karşılaştırılmıştır. Son olarak Bölüm 6'da çalışmanın sonuçları ele alınmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ters kinematik analizi

Kinematik analizi yapabilmek için öncelikle robot manipülörüne ait Denavit-Hartenberg (D-H) parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Robot manipülörün kaç adet

eklemi varsa her biri için D-H parametreleri çıkarılır ve tablo haline getirilir. Şekil 1.'de robot manipülâtörünün görseli verilmiştir. Eklemler (J) ve eklem açıları (θ) şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekil 1. üzerinde verilen kırmızı çizgiler, robot eklemlerinin koordinatlarından (x, y, z) biri olan z eksenini, bir başka deyişle eklemlerin dönüş eksenlerini temsil etmektedir. Tablo 1.'de ise Mitsubishi Melfa RV-7FL-D serisinin robot manipülâtörünün kinematik analizi için oluşturulmuş D-H tablosu verilmiştir [10].



Şekil 1. Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipülâtörünün görseli ve eklem açıları.

Figure 1. Visualisation of Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipulator and joint angles.

Eksenin z eksenini boyunca dönüş açısı θ , ardışık iki eklemin z eksenini boyunca x eksenleri arasındaki mesafe d, x eksenini boyunca ardışık iki z eksenini arasındaki mesafe a, x eksenini boyunca dönüş açısı α ile ifade edilir. Burada S ile adlandırılan sütun, eklemlerin en büyük ve en küçük sınırlarını ifade etmektedir.

Tablo 1. Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipülâtörü serisinin D-H parametreleri.

Table 1. D-H parameters of Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipulator series.

N	θ	d(mm)	a(mm)	$\alpha(^{\circ})$	S($^{\circ}$)
1	θ_1	$d_1=400$	0	$\alpha_1=90$	± 240
2	θ_2	$d_2=435$	$a_2=-50$	0	-110~130
3	θ_3	$d_3=470$	0	$\alpha_3=90$	0~162
4	θ_4	$d_4=85$	0	$\alpha_4=90$	-200~200
5	θ_5	0	0	$\alpha_5=90$	-120~120
6	θ_6	0	0	0	-360~360

Bir ekleme ait dönüşüm matrisini elde etmek için Eş. 1'de verilen bitişik koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisi kullanılır.

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_i \\ \sin\theta_i \cos\alpha_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & -d_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_i & \cos\theta_i \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Her bir eklemin dönüşüm matrisinin peşpeşe çarpılmasıyla uç-efektörün konumu belirlenebilir. Eş. 2'de eklemlerin dönüşüm matrislerinin çarpımları sonucu elde edilen homojen dönüşüm matrisi verilmiştir.

$${}^0T = \prod_{i=1}^6 {}^{i-1}T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Eş. 2'de verilen a, o, n, uç-efektörün 3 birim vektörünü ifade eder ve sırasıyla x, y ve z eksenlerinin yön vektörleridir. Uç-efektörün pozisyon vektörü, p ile gösterilmiştir. Robot manipülâtörün duruş pozunu Eş.3'te gösterilmiştir.

$$P(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$R_{3 \times 3}$, uç-efektörün koordinat sistemini gösteren 3×3 'lük matristir. P ise uç-efektörün duruş matrisidir.

2.2. Gri kurt optimizasyon algoritması

Gri Kurt Optimizasyon algoritması kurt sürüsünün doğadaki hiyerarşik yapısından esinlenerek oluşturulmuştur. Gri kurtlar sürü şeklinde avlanır. Av bulunduğu; Alfa, beta, delta ve omega kurtlarının avını kovalamasına ve en sonunda avını kuşatma davranışlarını tanımlar.

Sürüdeki en güçlü kurt olma özelliğini gösteren alfa kurt göç ve avlanmada lider konumundadır. Alfa kurttan sonra gelen ikinci güçlü kurt beta olarak adlandırılır. Hiyerarşi sıralamasında beta kurdu delta kurt takip eder. Alfa, beta, delta kurtlarının dışında kalan sürünün diğer kurtları omega kurt olarak adlandırılır. Gri kurt optimizasyon algoritmasının matematiksel modeli aşağıda verilmiştir [11].

Kurt ile av arasındaki mesafe Eş. 4 - Eş. 6'daki gibi hesaplanır.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}(t)| \quad (4)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}(t)| \quad (5)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}(t)| \quad (6)$$

Alfa, beta ve delta kurtlarının rastgele bozulmalarını temsil eden ve Eş. 7 ile hesaplanan vektörler sırasıyla $\vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_3$ vektörleridir. $\vec{D}_\alpha, \vec{D}_\beta, \vec{D}_\delta$ sırasıyla alfa, beta ve delta kurtlarının av ile aralarındaki mesafeyi, $\vec{X}_\alpha, \vec{X}_\beta, \vec{X}_\delta$ kurtların pozisyon vektörünü temsil eder. $\vec{X}(t)$ gri kurdun t. iterasyondaki geçerli konumunu ifade eder. $\vec{X}_i (i = \alpha, \beta, \delta)$ avın konum vektörleridir.

$$\vec{C}_i = 2\vec{r}_i \quad (7)$$

$\vec{r}_i, [0,1]$ 'de rastgele bir vektördür.

Alfa, beta ve delta kurtlarının pozisyonları aşağıda verilen Eş. 8 - Eş. 10'daki gibi hesaplanır.

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \quad (8)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \quad (9)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (10)$$

$\vec{X}_i (i=1,2,3)$ alfa, beta ve delta kurtlarının konum vektörleridir. $\vec{A}_i (i=1,2,3)$ alfa, beta ve delta kurtlarının konum vektörlerinin

katsayılarıdır. $\vec{D}_i(i=\alpha,\beta,\delta)$ alfa, beta ve delta kurtlarının av ile arasındaki mesafeyi belirtir.

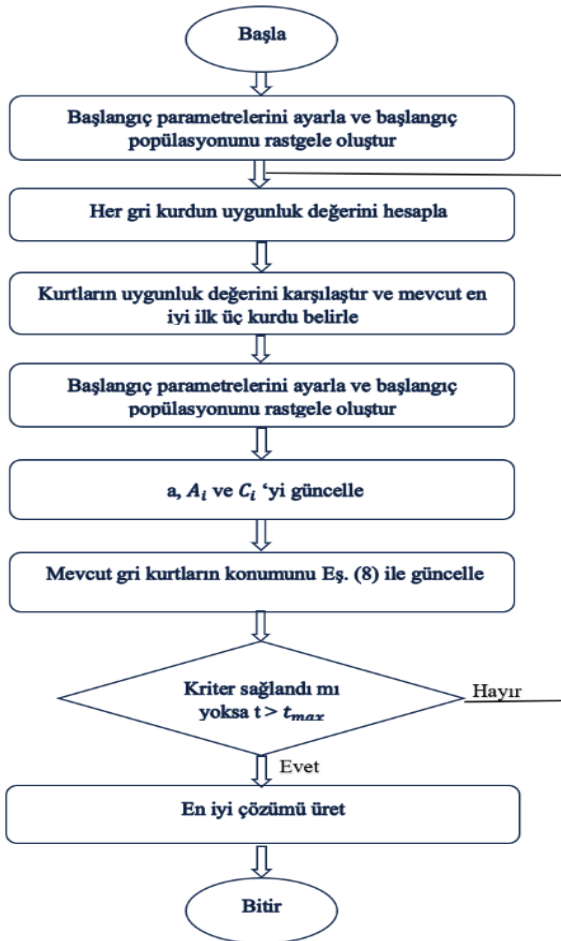
$$\vec{A} = 2a\vec{r}_1 - a \quad (11)$$

\vec{r} [0,1] arasında rastgele seçilmiş bir vektördür. a yakınsama faktörüdür ve iterasyon sayısının artmasıyla birlikte 2'den 0'a doğrusal olarak düşer. a faktörü Geleneksel Gri Kurt Optimizasyon algoritmasında şu şekilde tanımlanabilir:

$$a = 2 - 2\left(\frac{t}{max}\right) \quad (12)$$

t iterasyon sayısıdır, max ise en büyük iterasyon sayısıdır. $|\vec{A}| > 1$ olduğunda kurtlar küresel aramaya karşılık iyi bir av bulabilmek için arama alanlarını genişletirler. $|\vec{A}| < 1$ olduğunda kurtlar yerel aramaya karşılık gelen alanlarını daraltırlar.

Gri Kurt algoritmasının sözde kodu Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 2. Gri Kurt Optimizasyon Algoritması sözde kodu [12]

Figure 2. Grey Wolf Optimisation Algorithm pseudo code [12]

Geleneksel Gri Kurt Optimizasyon algoritmasında yakınsama katsayısı doğrusal olarak alınmaktadır. Geliştirilmiş Gri Kurt Optimizasyon algoritmasıyla yakınsama katsayısı, doğrusal olmayan yakınsama formülü ile değiştirilmiştir. Algoritmada belirlenen ajan sayısı yakınsama formülüne dahil edilmiştir. Doğrusal olmayan yakınsama katsayısı formülü Eş. 13'te verilmiştir [8].

$$a = 2 \times \left(\frac{-t+s}{e^{max}} \right) \quad (13)$$

Burada s algoritmada seçilen ajan sayısıdır, t geçerli iterasyon sayısıdır, max ise algoritmada verilen en büyük iterasyon sayısıdır.

2.3. Çoklu denemeli diferansiyel evrim algoritması

Çoklu Denemeli Diferansiyel Evrim (ÇDDE) algoritmasında amaç farklı optimizasyon problemleri için farklı arama stratejileri kullanacak bir algoritma geliştirmektir. ÇDDE algoritması iki temel adımdan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla başlatma adımı ve çoklu deneme vektörü yaklaşımına dayanan hareket adımlarıdır. Başlatma adımında x_1 'den x_N 'e kadar N tane birey Eş.14 kullanılarak alt sınır (l) ve üst sınır (u) arama uzayına rastgele dağıtılır.

$$x_{ij} = l_j + (u_j - l_j) \times rand(0.1) \quad (14)$$

Burada x_{ij} , i . bireyin j . boyuttaki konumunu, l_j ve u_j ise j . boyuttaki alt ve üst sınırı ifade etmektedir. $f(x_i)$ uygunluk fonksiyonu ile her bir bireyin uygunluk fonksiyonu hesaplanarak en küçük uygunluk değerine sahip birey g_{best} olarak atanır [13].

Çoklu Deneme Vektörü yaklaşımına dayalı hareket adımında problemler için farklı deneme vektörü üreticileri (DVÜ/TVP) kullanılmaktadır. Böylelikle çeşitli problemler için anlamlı bir arama stratejisi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla üç farklı DVÜ kullanılır. Bunlar sırasıyla; temsili tabanlı deneme vektörü üreticisi (T-DVÜ/R-TVP), yerel rastgele tabanlı deneme vektörü üreticisi (Y-DVÜ/L-TVP) ve küresel en iyi geçmişe dayalı deneme vektörü üreticisidir (K-DVÜ/G-TVP). Bunlardan T-DVÜ yerel optimuma yakalanmayı önleyecek ve çeşitliliği koruyacak, Y-DVÜ hızlı bir yakınsamanın yanında keşif ve kullanım arasındaki dengeyi sağlayacak, K-DVÜ ise yerel optimumdan yararlanma ve kaçış sağlayacaktır. Hareket adımı dört alt adımdan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla kazanana dayalı dağıtım, çoklu deneme vektörü üretme, değerlendirme ve ömür boyu arşivleme adımlarıdır. Kazanana dayalı dağıtım adımı Tanım 1 ve Tanım 2'ye dayanmaktadır [13].

Tanım 1: Her biri n iterasyon içeren k tane WinTerv verilmiş ve her WinTerv için Win-TVP ile ifade edilen bir tane kazanan DVÜ bulunur. İlk iterasyon için T-DVÜ Win-TVP olarak kabul edilir. Daha sonra her iterasyon için en yüksek iyileştirme oranına sahip DVÜ yeni Win-TVP olarak güncellenir. IR_{X-TVP} ile ifade edilen iyileştirilmiş X-TVP oranı Eş. 15'de verilmiştir. X-TVP; T, Y ya da K-DVÜ'yü ifade etmektedir.

$$IR_{X-TVP} = IF_{X-TVP} + FE_{X-TVP} \quad (15)$$

Burada IF_{X-TVP} ve FE_{X-TVP} sırasıyla X-TVP tarafından geliştirilmiş inceliklerin sayısını ve bir iterasyondaki fonksiyon değerlendirmelerinin sayısını ifade eder. Win-TVP belirlendikten sonra Tanım 2'deki dağıtım politikası kullanılarak deneme vektörleri T-DVÜ, Y-DVÜ ve K-DVÜ arasında dağıtılır.

Tanım 2: Verilen N_{R-TVP} , N_{L-TVP} ve N_{G-TVP} sırasıyla X_{R-TVP} , X_{L-TVP} ve X_{G-TVP} alt popülasyonların boyutlarını ifade etmektedir. Ardından, N birey bu alt popülasyonlara rastgele dağıtılarak büyüklükleri Win-TVP'ye göre Eş. 16 ve Eş. 17'de belirtilen ödül ve ceza kuralları ile belirlenir.

Ödül kuralı: Eğer T-DVÜ ya da Y-DVÜ Win-TVP ise,

$$N_{Win-TVP} = 0.6 \times N \text{ ve } N_{Loser-TVPs} = 0.2 \times N \quad (16)$$

Ceza kuralı: Eğer K-DVÜ Win-TVP ise,

$$N_{G-TVP} = 0.2 \times N \text{ ve } N_{Loser-TVPs} = 0.4 \times N \quad (17)$$

Nihai deneme vektörlerini oluşturmak için, hem T-DVÜ hem de K-DVÜ ürettikleri deneme vektörlerini karşılık gelen bireyler üzerinden çaprazlar. Bu çaprazlama her iterasyonda oluşturulan M dönüşüm matrisi ve onun tersi M^- ile yapılır. Ayrıca, T-DVÜ ve Y-DVÜ popülasyondaki bireylerin birliği olan unionPopulation (X_{u_pop}) adlı ek bir popülasyon ile çeşitlilik ve bilgi paylaşımını sürdürmek için ömür boyu arşiv kullanır. Her x_i için $F_i = randc_i(\mu_f, \sigma)$ olacak şekilde Cauchy dağılımı ile F ölçek faktörü hesaplanır. Burada μ_f Geliştirilmiş ölçek faktörlerinin ortalama değerini ve σ sabit değeri 0.2 olan varyansı ifade etmektedir. F_i değeri (0,1] arasında olmalıdır. 1'den büyük ise 1 kabul edilir, 0'a eşit veya küçük ise tekrar hesaplanır. μ_f değeri başlangıçta 0.5 olarak alınır. Popülasyonda herhangi bir gelişmiş birey varsa μ_f Eş. 18'de verilen ağırlıklı Lehmer ortalaması ile hesaplanır. Gelişmiş bir birey yoksa ölçek faktörleri değişmeden kalır.

$$\mu_f = \frac{\sum_{f_i \in S_f} \omega_{f_i} \times f_i^2}{\sum_{f_i \in S_f} \omega_{f_i} \times f_i} \quad (18)$$

Burada S_f geçerli iterasyondaki $f(u_i) < f(x_i)$ olan tüm F_s kümesini ve ω_{f_i} ağırlığı Eş. 19'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta f_i = f(x_i) - f(u_i), \omega_{f_i} = \frac{\Delta f_i}{\sum_{f_i \in S_f} \Delta f_i} \quad (19)$$

T-DVÜ, yerel optimum yakalanmayı önlemek ve çeşitliliği sağlamak için tasarlandığından unionPopulation'dan rastgele bir birey olan x_{u_pop} ile x_{i_best} ve x_{i_worst} bireylerinin konumlarını kullanarak x_i bireyini alt popülasyonundan taşır. x_{i_best} ve x_{i_worst} sırasıyla X_{R-TVP} alt popülasyonunun uygunluk değerlerinin artan ve azalan sıralı gösteriminin i . öğeleridir. T-DVÜ'deki u_i deneme vektörü Eş. 20'de M ve M^- matrisleri kullanılarak üretilir. v_i ise Eş. 21'deki gibi elde edilir [13].

$$u_i = M \times x_i + \underline{M} \times v_i \quad (20)$$

$$v_i = x_i + F_i \times (x_{i_best} - x_i) + F_i \times (x_{i_worst} - x_i) + a_1 \times (x_{u_pop} - x_i) \quad (21)$$

Burada a_1 arama sürecinin erken safhalarında daha yüksek, ileri safhalarında daha düşük değerler alan doğrusal olarak azaltılmış bir katsayıdır ve Eş. 22'deki gibi hesaplanır.

$$a_1 = 2 - \text{iter} \times (2/\text{MaxIter}) \quad (22)$$

Y-DVÜ, sadece kendi alt popülasyonundaki bireylerden değil, ayrıca unionPopulation'daki bireylerden de öğrenerek keşif ve kullanım arasındaki dengeden ve hızlı bir yakınsamadan yararlanır. X_{L-TVP} 'den rastgele seçilen x_{r1} ve x_{r2} bireylerinin konumları arasındaki fark ve x_i 'nin rastgele seçilmiş bir x_{u_pop} 'den farkı Eş. 23'de gösterildiği gibi x_i 'nin konumunu değiştirir.

$$v_i = x_i + F_i \times (x_{r1} - x_{r2}) + a_2 \times (x_{u_pop} - x_i) \quad (23)$$

Burada a_2 Eş. 24'teki gibi hesaplanan doğrusal olmayan bir şekilde azalan katsayıyı ifade eder.

$$a_2 = \text{initial} - (\text{initial} - \text{final}) \times \left(\frac{\text{MaxIter} - \text{iter}}{\text{MaxIter}} \right)^{\text{Mu}} \quad (24)$$

Burada initial ve final a_2 kontrol parametresinin başlangıç ve sonuç değerlerini, Mu ise bağımlı değer boyutunu ifade eder. T-DVÜ'den farklı olarak burada nihai deneme vektörü u_i bir evrime

değil bireysel öğrenmeye dayalıdır. Bu sebeple bir geçiş kullanmaz ve $u_i = v_i$ olduğu söylenebilir.

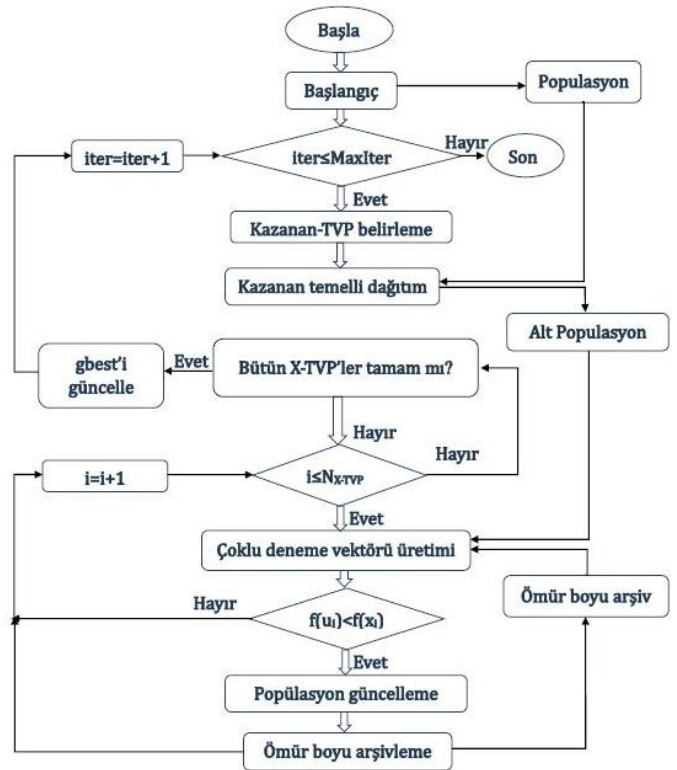
K-DVÜ küresel en iyi değer geçmişini kullanarak yerel optimuma yakalanma sorununun üstesinden gelmeye çalışır. İlk iterasyon için küresel en iyi değer (g_{best}) ile başlatılır. Ardından her iterasyonda g_{best} değerleri küresel en iyi değer geçmişine eklenir. Ayrıca K-DVÜ için g_{best} geçmişinden N_{G-TVP} satırları ve D sütunları olan M_{gb-h} matrisi oluşturulur. Bu yapı sayesinde farklı en iyi bireyler kullanılarak çeşitlilik kaybı önlenebilir. Her iterasyonda M_{gb-h} matrisi g_{best} geçmişini N/m kez kopyalayarak oluşturulur. Burada m g_{best} geçmiş üyelerinin sayısını ifade etmektedir. Ardından Eş. 25 ve Eş. 26 kullanılarak sırasıyla u_i deneme vektörü ve v_i üretilir [13].

$$u_i = M \times x_i + \underline{M} \times v_i \quad (25)$$

$$v_i = x_{i_{gb-h}} + a_2 \times (x_{r1} - x_{r2}) \quad (26)$$

Burada $x_{i_{gb-h}}$ M_{gb-h} matrisinin i . satırındadır. x_{r1} ve x_{r2} ise X_{G-TVP} 'den rastgele seçilmiş iki bireydir.

Değerlendirme adımı, U_{X-TVP} 'den gelen her u_i 'nin kalitesi, X_{X-TVP} 'den karşılık gelen x_i bireyleriyle karşılaştırılır. $f(u_i) \geq f(x_i)$ ise x_i değişmeden kalır, eğer $f(u_i) < f(x_i)$ ise x_i 'nin konumu u_i ile güncellenir. Ayrıca, her bir DVÜ tarafından iyileştirilen birey sayısı 1 artırılarak denklem (18)'de kullanmak üzere F_i değeri depolanır.



Şekil 3. Çoklu Denemeli Diferansiyel Evrim Algoritması sözde kodu [13].

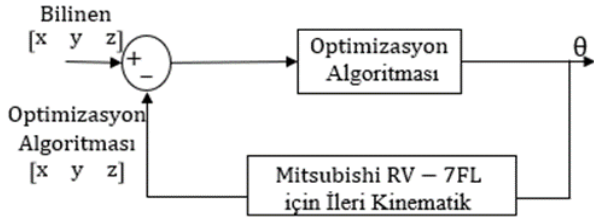
Figure 3. Pseudo code of the Multiple Trial Differential Evolution Algorithm [13].

Ömür boyu arşivleme adımında x_i ömür boyu arşive daha düşük bir çözüm olarak eklenir. Arşiv başlangıçta boştur ve N tane bireyin konum ve ömür bilgilerinin tutabilir. Her iterasyon sonunda arşivlenen bireylerin ömrü 1 artar ve N tane en genç birey arşivlenir. Son olarak her iterasyonda iterasyon sayısı (iter)

1 artırılır ve tanımlanmış olan iterasyon değerine (MaxIter) ulaşana kadar evrimsel arama yinelenir [13]. ÇDDE algoritmasının sözde kodu Şekil 3'te verilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada robot manipülâtörün duruş pozunu için konum değerleri seçilmiştir. Seçilen konum değerleri ile optimizasyon algoritmasının bulduğu eklem açı değerlerine göre ileri kinematik hesaplaması yapılmıştır. Hesaplama sonucu elde edilen duruş pozunu ile hedeflenen duruş pozunu arasındaki hata verilen iterasyonlar tamamlanmaya kadar hesaplanarak amaç fonksiyonu en aza indirmek istenmiştir. Şekil 4'te sistemin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4. Sistem blok diyagramı

Figure 4. System block diagram

Ters kinematik analizi için kullanılan 3 algoritmada da amaç fonksiyonu olarak Eş. 27'de verilen matematiksel ifade kullanılmıştır. İterasyon sonucu elde edilen F değeri, hedeflenen konum ile optimizasyon algoritmaları sonucunda elde edilen açı değerlerinin yerine konmasıyla alınan konum bilgisi arasındaki mutlak hatayı ifade etmektedir.

$$F = \sqrt{(p_x - \underline{p}_x)^2 + (p_y - \underline{p}_y)^2 + (p_z - \underline{p}_z)^2} \quad (27)$$

p_x, p_y, p_z , optimizasyon sonucu verilen koordinat değerleridir. $\underline{p}_x, \underline{p}_y, \underline{p}_z$ ise hedef koordinat değerleri.

Kullanılan optimizasyon algoritmaları ile birlikte amaç fonksiyonunu minimize etmek istenmektedir. Robot manipülâtörünün hedef duruş pozunu ve optimizasyon sonucu alınan eklem açı değerleri ile elde edilen duruş pozunu arasındaki öklid uzaklığının en az olması amaçlanmaktadır.

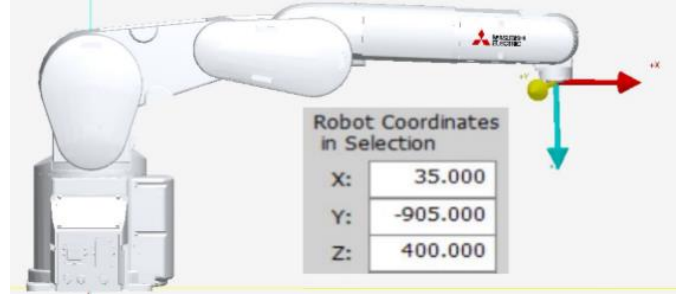
Bu çalışmada üç farklı senaryo için farklı konum değerleri seçilmiş, Geleneksel GKO, Geliştirilmiş GKO ve ÇDDE optimizasyon algoritmaları ile koşturulmuştur. Algoritmalarla kullanılacak iterasyon sayısının belirlenebilmesi için yapılan doygunluk çalışmasında her iki algoritma belli iterasyon değerleriyle koşturulmuş ve GKO algoritmasının 1000 iterasyon sonucu, ÇDDE algoritmasının ise 600000 iterasyon sonucunda doygunluğa ulaştığı görülmüştür. Her iki algoritmanın doygunluk iterasyon sayısı sonuçlarının rahat şekilde karşılaştırılabilmesi için, 3 senaryo da 300 ajan sayısı ile önce 1000 iterasyon daha sonra 600000 iterasyon ile kodlar 10'ar kere çalıştırılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Bu senaryolar için kullanılan konum değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Her bir senaryo farklı bir robot konfigürasyonunu ifade etmektedir. Çalışma için Mitsubishi RV-7FL-D robot manipülâtörün fiziksel özellikleri ve mekanik sınırları ile ileri kinematik matematisel ifadesi kodda tanımlanmıştır. Manipülâtörün 6. eklemine d-h parametresinde a, α ve d değerleri 0 olduğu için manipülâtörün duruş pozunu θ_6 'dan bağımsızdır. Kod, intel CORE i5 işlemcili ve 8 gb ram'lik bilgisayarda Matlab R2022b sürümünde çalıştırılmıştır.

Tablo 2. Senaryolar için kullanılan konum değerleri.

Table 2. Location values used for the scenarios.

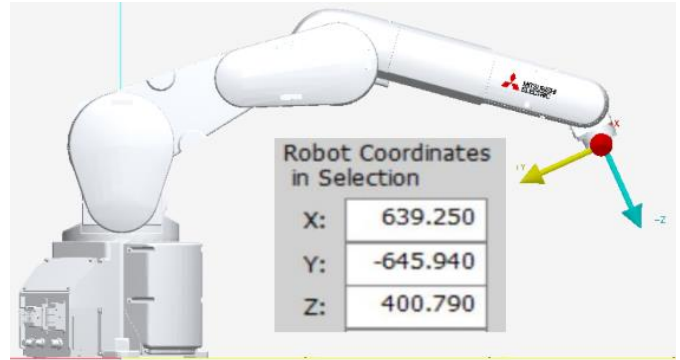
Senaryo	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Durum 1	35	-905	400
Durum 2	639.25	-645.94	400.79
Durum 3	-50	-905	315

Şekil 5., 6. Ve 7.'de Tablo 2.'deki konum değerleri için robot kol duruş pozlarına ait simülasyon görselleri verilmiştir. Simülasyon görselleri RT Toolbox 3 simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir.



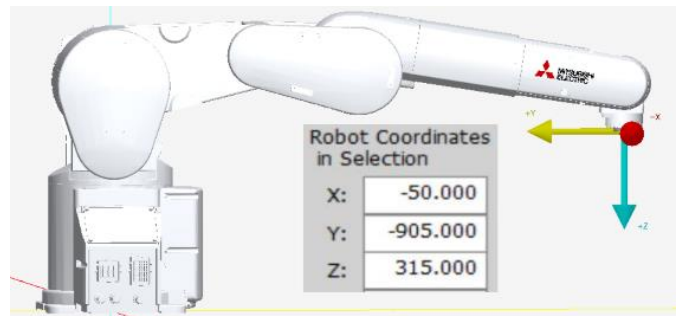
Şekil 5. Durum 1 için robot kol duruş pozunu

Figure 5. Robot arm pose for case 1



Şekil 6. Durum 2 için robot kol duruş pozunu

Figure 6. Robot arm pose for case 2



Şekil 7. Durum 3 için robot kol duruş pozunu

Figure 7. Robot arm pose for case 3

Uygulanan üç senaryo, kullanılan optimizasyon algoritmaları ile 10'ar kere koştuktan sonra elde edilen en iyi sonuçlar 1000 iterasyon için Tablo 3.,4. ve 5.'te, 600000 iterasyon için Tablo 6., 7. Ve 8.'de verilmiştir.

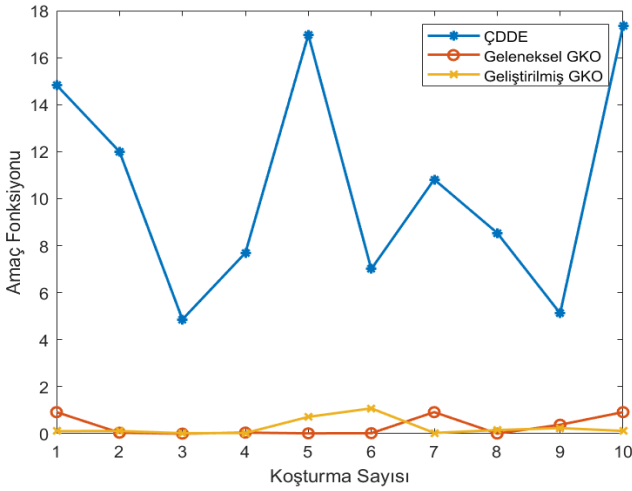
Farklı konum değerleri için oluşturulmuş senaryolar 1000 iterasyonla koşturulduğunda üç algoritma için alınan değerler tablo haline getirilmiş ve amaç fonksiyonu ile iterasyonu tamamlama süreleri bakımından karşılaştırılmıştır. Tablo 3.,4. ve 5.'te verilen değerlere bakıldığında düşük iterasyonda Geleneksel GKO algoritmasının diğer algoritmalarla göre daha küçük bir hata verdiği görülmüştür. Algoritma hızları karşılaştırıldığında ise

ÇDDE algoritmasının diğer algoritmalarla göre çok daha hızlı iterasyon sayısını tamamladığı sonucuna varılmıştır. Yine 1000 iterasyon için Şekil 8, 9. ve 10. incelendiğinde Geleneksel GKO algoritmasının amaç fonksiyon değerinin diğer iki algoritmaya göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Durum 1 için elde edilen benzetim sonuçları.

Table 3. Simulation results for case 1.

	Geleneksel GKO	Geliştirilmiş GKO	ÇDDE
θ_1	-0.000	-0.034	-1.270
θ_2	-1.573	-13.040	69.626
θ_3	90.647	95.413	50.209
θ_4	2.127	-108.054	107.185
θ_5	60.021	8.772	101.883
θ_6	-351.786	-19.308	-198.600
Süre(sn)	7.335	13.010	0.062
F	0.0005234	0.020942	4.8606



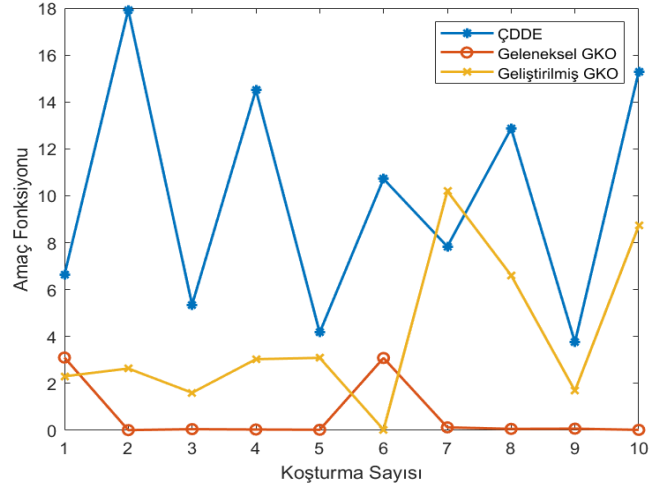
Şekil 8. Durum 1 için amaç fonksiyonunun karşılaştırılması.

Figure 8. Comparison of the objective function for case 1.

Tablo 4. Durum 2 için elde edilen benzetim sonuçları.

Table 4. Simulation results for case 2.

	Geleneksel GKO	Geliştirilmiş GKO	ÇDDE
θ_1	49.925	39.494	47.744
θ_2	74.607	-104.047	125.486
θ_3	160.190	159.899	115.788
θ_4	51.792	-9.511	187.684
θ_5	-16.766	115.859	5.659
θ_6	8.247	-41.369	351.257
Süre(sn)	6.651	9.417	0.065
F	0.0096858	0.028033	3.7567



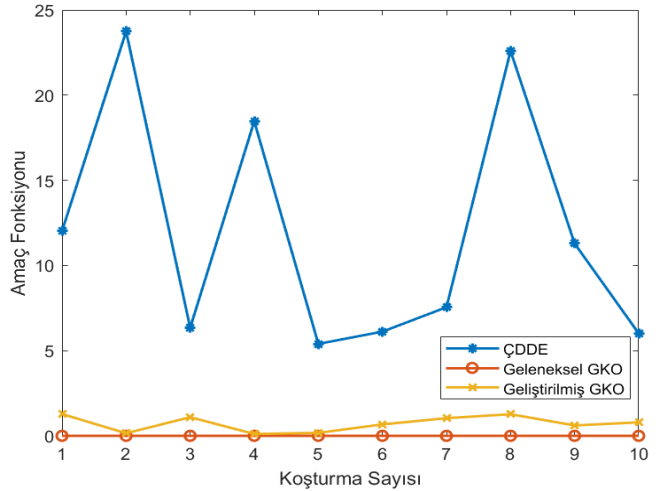
Şekil 9. Durum 2 için amaç fonksiyonunun karşılaştırılması.

Figure 9. Comparison of the objective function for case 2.

Tablo 5. Durum 3 için elde edilen benzetim sonuçları.

Table 5. Simulation results for case 3.

	Geleneksel GKO	Geliştirilmiş GKO	ÇDDE
θ_1	-3.552e-14	-0.110	-5.132
θ_2	-5.455e-15	0.080	48.779
θ_3	3.854e-13	1.098	5.293
θ_4	-0.662	-27.317	-62.995
θ_5	-4.380	93.551	-112.584
θ_6	35.804	124.724	-248.472
Süre(sn)	9.540	16.274	0.043
F	0	0.10833	5.3988



Şekil 10. Durum 3 için amaç fonksiyonunun karşılaştırılması.

Figure 10. Comparison of the objective function for case 3.

İterasyon değeri 600000 yapılarak algoritmaların her biri uygulanan üç senaryoya göre tekrar koşturulmuş ve yeni değerlere göre tablolar tekrar oluşturulmuştur.

Tablo 6. Durum 1 için elde edilen benzetim sonuçları.

Table 6. Simulation results for case 1.

	Geleneksel GKO	Geliştirilmiş GKO	ÇDDE
θ_1	-4.188e-07	1.974e-05	-1.840e-13
θ_2	0.044	0.245	3.048e-05
θ_3	89.981	89.898	89.999
θ_4	16.216	-40.808	-111.123
θ_5	7.208	4.464	40.848
θ_6	-215.0742	20.866	-33.632
Süre(sn)	5167.561	3997.204	13.566
F	4.071e-07	0.000501	0

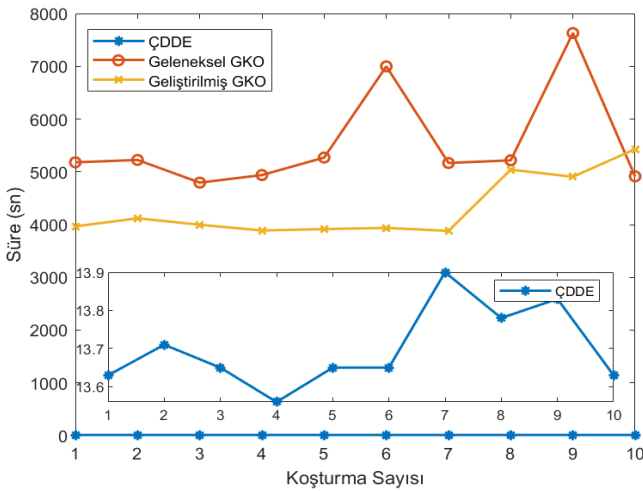

Şekil 11. Durum 1 için benzetim süreleri karşılaştırılması.

Figure 11. Comparison of simulation times for case 1.

Durum 1 için [35, -905, 400] konum değerleri seçilmiştir. Geleneksel GKO, Geliştirilmiş GKO ve ÇDDE algoritmaları için elde edilen en iyi sonuçlar Tablo 6.'da verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında en hızlı sonuca ulaşan algoritmanın ÇDDE olduğu görülmüştür. Amaç fonksiyonlarına bakıldığında ÇDDE algoritmasının diğer algoritmalara göre daha hızlı bir şekilde 0 hataya ulaştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 11.'de Durum 1 için tekrarlanan benzetim çalışmalarının süreleri verilmiştir. Şekle bakıldığında ÇDDE algoritmasının diğer algoritmalara göre çok daha hızlı olduğu görülmüştür.

Tablo 7. Durum 2 için elde edilen benzetim sonuçları.

Table 7. Simulation results for case 2.

	Geleneksel GKO	Geliştirilmiş GKO	ÇDDE
θ_1	39.474	39.474	49.928
θ_2	105.452	-104.359	-75.641
θ_3	19.735	160.264	19.735
θ_4	-37.033	12.298	138.765
θ_5	-0.485	29.04	8.730
θ_6	7.208	5.141	33.997
Süre(sn)	3632.120	3832.507	13.703
F	1.685e-05	0	0

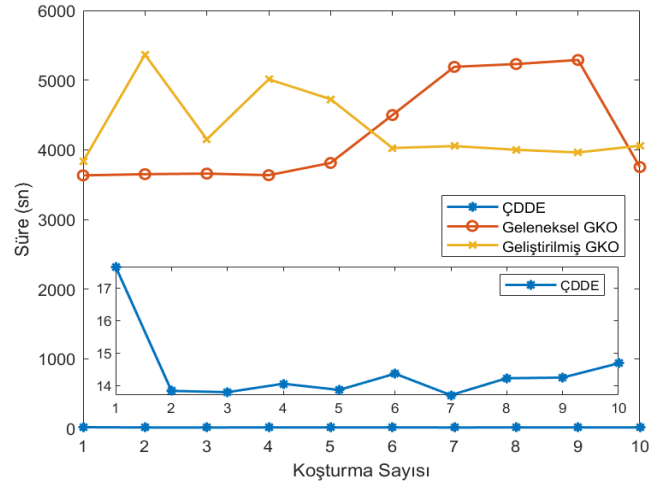

Şekil 12. Durum 2 için benzetim süreleri karşılaştırılması.

Figure 12. Comparison of simulation times for case 2.

Durum 2 için [639.25, -645.94, 400.79] konum değerleri seçilmiştir. Geleneksel GKO, Geliştirilmiş GKO ve ÇDDE algoritmaları için elde edilen en iyi sonuçlar Tablo 7.'de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında Geliştirilmiş GKO ile ÇDDE algoritmalarının amaç fonksiyonlarının sıfırlandığı görülmüştür. Şekil 12.'de de görülebileceği gibi ÇDDE algoritmasının daha hızlı bir şekilde sonuca ulaştığı gözlemlenmiştir.

Tablo 8. Durum 3 için elde edilen benzetim sonuçları.

Table 8. Simulation results obtained for case 3.

	Geleneksel GKO	Geliştirilmiş GKO	ÇDDE
θ_1	-1.136e-15	1.090e-15	-6.132e-14
θ_2	1.120e-14	-8.729e-15	-3.052e-14
θ_3	0	0	6.854e-13
θ_4	-28.409	-170.772	-4.852
θ_5	-71.222	120	26.650
θ_6	360	6.435	-165.478
Süre(sn)	4651.523	4555.162	18.050
F	0	0	0

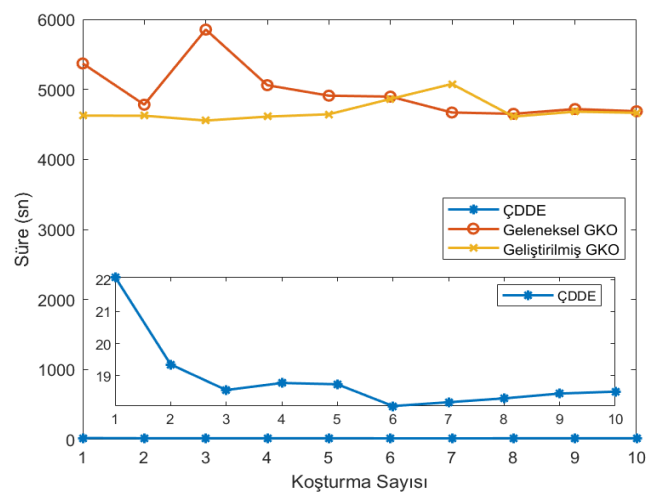

Şekil 13. Durum 3 için benzetim süreleri karşılaştırılması.

Figure 13. Comparison of simulation times for case 3.

Durum 3 için [-50, -905, 315] konum değerleri seçilmiştir. Geleneksel GKO, Geliştirilmiş GKO ve ÇDDE algoritmaları için elde edilen en iyi sonuçlar Tablo 8.'de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında tüm algoritmalar için amaç fonksiyonlarının sıfırlandığı görülmüştür. Fakat ÇDDE algoritmasının diğer algoritmalara göre daha hızlı bir şekilde iterasyonlarını tamamladığı gözlenmiştir. Şekil 13. incelendiğinde yine ÇDDE algoritmasının daha hızlı olduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Mitsubishi Melfa RV-7FL-D robot manipülörün ters kinematik analizi yapılmıştır. Belirtilen konumlar için Geleneksel GKO, Geliştirilmiş GKO ve ÇDDE algoritmaları kullanılarak farklı iterasyon değerlerine göre eklem açıları hesaplanmıştır. Alınan sonuçlar neticesinde ÇDDE optimizasyon algoritmasının Geleneksel GKO ve Geliştirilmiş GKO algoritmasına göre iki iterasyon değerinde de çok daha hızlı iterasyonlarını tamamladığı görülmüştür. Düşük iterasyon değeri için ÇDDE algoritması diğer algoritmalara göre daha kötü sonuç vermiştir fakat çok daha hızlı olması avantajları arasındadır. Benzer şekilde yüksek iterasyon değerlerinde ÇDDE algoritmasının amaç fonksiyonu değerlerinin tüm konumlar için 0'a ulaştığı gözlemlenmiştir. İterasyon sayısı düşük tutulduğunda Geleneksel GKO algoritması ile ÇDDE ve Geliştirilmiş GKO'ya göre daha iyi amaç fonksiyon değeri alınmıştır. İterasyon sayısını artırıldığında ise ÇDDE ve Geliştirilmiş GKO algoritmalarının Geleneksel GKO'ya göre daha iyi sonuç verdiği, hızlı bir şekilde amaç fonksiyonunun minimuma indirdiği görülmüştür.

Kısaca söylemek gerekirse, ters kinematik analizinde Newton-Raphson gibi sayısal ve analitik yöntemler sıklıkla kullanılırken eklem sayısının artması ve işlemlerin daha karmaşık hale gelmesi, çözüme ulaşma sürecini zorlaştırması ve zaman alması sebebiyle akıllı algoritmalara başvurulmuştur. Optimizasyon algoritmaları farklı sistemlerde farklı sonuçlar verebilmektedir. Bir optimizasyon algoritması bir sistemde çok iyi sonuç verebilirken başka bir sistemde iyi sonuç vermeyebilir. Ters kinematik analizi sisteminde kullanılan GKO ve ÇDDE algoritması karşılaştırılmasında ÇDDE'nin sonuç verme süresinin daha kısa olması ve mutlak hatayı sıfırlaması ile GKO algoritmasına üstün geldiği görülmüştür.

Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgilere göre optimizasyon algoritmalarının gerçek zamanlı robot manipülasyonlarında kullanıldığı görülmüştür. Gelecek çalışmada bu çalışmada elde edilen verilerin gerçek zamanlı robot konfigürasyonu üzerinde denenmesi ve analizinin yapılması hedeflenmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Zhang Q., Zhang Y., Gao L. and Cao H. 2021. Analysis of the effect of objective function on the performance of the algorithm for the inverse kinematic of manipulator, 2021 14th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 11-12 December, Hangzhou, China, 91-95.
- [2] Yiyang L., Xi J., Hongfei B., Zhining W. and Liangliang S. 2021. A General Robot Inverse Kinematics Solution Method Based on Improved PSO Algorithm, IEEE Access, vol. 9, pp. 32341-32350. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3059714.
- [3] Alkayyali M. and Tutunji T. A. 2019. PSO-based Algorithm for Inverse Kinematics Solution of Robotic Arm Manipulators, 2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 23-24 May, Wels, Austria, 1-6.

- [4] Dereli S. and Köker R. 2020. Calculation Of The Inverse Kinematics Solution Of The 7-DOF Redundant Robot Manipulator By The Firefly Algorithm And Statistical Analysis Of The Results In Terms Of Speed And Accuracy, Inverse Probl. Sci. Eng., vol. 28(5), pp. 601-613. DOI: 10.1080/17415977.2019.1602124
- [5] Ram R.V., Pathak P.M. and Junco S.J. 2019. Inverse kinematics of mobile manipulator using bidirectional particle swarm optimization by manipulator decoupling, Mech. Mach. Theory, vol. 131, pp. 385-405. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.09.022
- [6] Dereli S. and Köker R. 2018. IW-PSO Approach To The Inverse Kinematics Problem Solution Of A 7-DOF Serial Robot Manipulator, Sigma J. Eng. Nat. Sci., vol. 36(1), pp. 77-85.
- [7] Marić F., Giamou M., Hall A. W., Khoubyarian S., Petrović I. and Kelly J. 2022. Riemannian Optimization for Distance-Geometric Inverse Kinematics. IEEE Transactions on Robotics, vol. 38(3), pp. 1703-1722. DOI: 10.1109/TRO.2021.3123841.
- [8] Dereli S. 2021. A new modified grey wolf optimization algorithm proposal for a fundamental engineering problem in robotics, Neural Computing and Applications., vol. 33, pp. 14119-14131. DOI: 10.1007/s00521-021-06050-2
- [9] Amiri M.S. and Ramli R. 2021. Intelligent Trajectory Tracking Behavior of a Multi-Joint Robotic Arm via Genetic-Swarm Optimization for the Inverse Kinematic Solution, Sensors, vol. 21(9), pp. 3171. DOI: 10.3390/s21093171
- [10] Özen F., Tukul D. and Dimirovski G. 2017. Synchronized dancing of an industrial manipulator and humans with arbitrary music, Acta Polytech. Hung., vol. 14(2), pp. 151-169. DOI: 10.12700/APH.14.2.2017.2.8
- [11] K. Zhao, Y. Liu and K. Hu, 2022. Optimal Pattern Synthesis of Array Antennas Using Improved Grey Wolf Algorithm, 2022 IEEE 12th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), 15-17 July, Beijing, China, 172-175.
- [12] Gai W., Qu C., Liu J. and Zhang J. 2018. An improved grey wolf algorithm for global optimization, 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), pp. 2494-2498, Shenyang, China, DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407544.
- [13] Nadimi-Shahraki M. H., Taghian S., Mirjalili S. and Faris H. 2020. MTDE: An effective multi-trial vector-based differential evolution algorithm and its applications for engineering design problems, Appl. Soft Comput., vol. 97(A), pp. 106761. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106761



Bir Hava Temizleme Cihazının Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi

Investigation of an Air Purifier Device Using Numerical and Experimental Methods

Fatih Kırmızıgöl^{1*}, Mehmet Uçar²

¹ Esalba Metal Sanayi A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Eskişehir, TÜRKİYE

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Departmanı, Kütahya, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: sfatihk23@gmail.com

Öz

İnsan yaşamının temiz hava ihtiyacını gidermek ve ortamların kirlilik oranını azaltmak için hava temizleme cihazları giderek artan bir ilgi görmeye başlamıştır. Çalışma kapsamında 200 m³/h hacimsel debi kapasitesi olan bir hava temizleme cihazı incelenmiştir. Ortam şartları, filtre basınç-debi grafikleri ve motor dönüş hızı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) sayısal çalışmasına sınır şartı tanımlanarak Deneysel HAD karşılaştırması yapılmıştır. Deneysel olarak ayrıca Ses Basınç Seviyesi (SPL) ölçümlenmiştir. HAD sayısal çalışmaları SolidWorks Flow Simulation (SWFS) ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hava giriş-çıkış bölgesine ortam basınç değeri ($P_s = 101235$ Pa), sıcaklığı ($T_o = 20^\circ\text{C}$) ve motor dönüş hızı (2000 RPM) tanımlanırken havalandırma cihazının çıkışındaki hacimsel debisi deney doğrulama parametresi olarak kullanılmıştır. SWFS yazılımında bulunan k- ϵ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) türbülans modeli seçilmiş ve doğrulanan ağ yapısında cihaz içerisinde oluşan türbülanslı bölgeler, tersinir akışlar ve sadece akışkana bağlı akustik ses gücü şiddeti iyileştirilerek ortaya yeni bir model konmuştur. İyileştirilmiş model ile mevcut model arasında ses basınç seviyesinde 2,7 dB(A) ve harcanan güçte %10,52 oranında azalma tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında mevcut ses yalıtım malzemesine ek olarak 2 farklı ses yalıtım malzemesi daha deneysel olarak incelenmiş toplamda 3 farklı ses yalıtım malzemesi ses basınç seviyesi arasında 6,4 dB(A) fark olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Covid19, HAD, Hava Temizleme Cihazı, Ses Basınç Seviyesi, Türbülans

Abstract

Air purifier devices have started to attract attention to clean the air for human life and reduce the environmental pollution rate. In this study, an air purifier capable of generating a volumetric flow rate of 200 m³/h was developed. Both experimental and Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical analyses were performed, and ambient conditions, the volumetric flow speed of the air outlet region, rotational speed-consumed power of the fan engine, and the resulting Sound Pressure Level (SPL) were measured in the experimental work. The CFD numerical simulations were performed using the SolidWorks Flow Simulation (SWFS). Boundary conditions are defined, such as ambient pressure ($P_s = 101235$ Pa), temperature ($T_o = 20^\circ\text{C}$), and engine rotation speed (2000 RPM) to the CFD. The volumetric flow rate at the air outlet region of the air purifier device was used as a validation parameter between the CFD and Experimental Work. The k- ϵ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence model was selected in the SWFS software, and a new model was introduced by improving the turbulent regions, reversible flows, and acoustic sound power intensity only due to the fluid in the verified mesh structure. As a result, the sound pressure level of 2.7 dB(A) decreased, and a reduction of 10.52% in power consumed was detected between the improved model and the current model. Within the scope of the study, in addition to the existing sound insulation material, two different sound insulation materials were examined experimentally, and it was determined that there was a sound pressure level of 6.4 dB(A) between 3 different sound insulation materials.

Keywords: Covid19, CFD, Air Purifier Device, Sound Pressure Level, Turbulence

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Air pollution is related to the concentration of particles in the air and can cause health problems both outdoors and indoors. While indoor air pollution can be managed with individual measures, outdoor air pollution generally requires national-level control. Indoor air purifiers are commonly used to reduce air pollution, especially for children. Effective filtration systems, such as HEPA filters, can enhance the efficiency of these purifiers. However, air purifiers should be used in conjunction with other health

measures. Research indicates that design improvements are necessary to reduce the noise levels and increase the energy efficiency of these devices. Improvements made to an existing air purifier resulted in a 2.7 dB(A) reduction in noise levels and a 10% gain in energy efficiency.

Materials and Methods

The capacity of air purifiers is expressed in terms of the room size they can clean. The device studied in this work can clean a room

of 80 m² with a ceiling height of 2.5 meters. Key components of the device include the air inlet region, carbon filter, H14 filter, filter compartment, fan motor, foam, rear cover, and air outlet region.

The filter compartment ensures proper air flow direction, and the H14 filter is capable of removing 99.95% of particles down to 0.1 µm. The fan motor must overcome the pressure created by the filters to produce clean air. The maximum resistance pressure for a 200 m³/h flow rate should be 236 Pa while the carbon filter and H14 filter create resistances of 80 Pa and 139 Pa, respectively.

Sound insulation products are used to reduce the fan motor's noise. The geometry of the sound insulation product and the position of the fan motor affect the device's noise level. The study aims to improve both the fan motor and sound insulation product.

In the experimental work, the two key features of air purifiers are flow capacity and sound pressure level. Flow rate determines the room size and cleaning capacity, while sound level should be non-intrusive. Flow rate tests are conducted using a balometer, and sound pressure tests are performed with a microphone in a 32 dB(A) room, following ISO 3744 standards.

To test the air purifier's performance with minimal prototyping costs, CFD simulations using SWFS software are conducted. The model assumes the device is airtight and simplifies its geometry. The SWFS software uses Navier-Stokes equations and turbulence models (k-ε RANS) to analyze fluid flow and turbulence. Acoustic power is estimated using Proudman formulas and sound pressure levels are calculated.

Results and Discussion

The accuracy of the CFD results was evaluated based on three different mesh structures: coarse, medium, and fine. The medium mesh structure was found to be the most appropriate as it provided a balance between accuracy and computational cost, with only a 4% difference between the simulated and experimental volumetric flow rates. CFD simulations using the medium mesh revealed that the airflow was stronger on the right side and weaker on the left, with turbulence and reverse flows present. To address these issues, two improvements were proposed. The first one is repositioning the fan motor to reduce

reverse flows and the second one is designing a new flow directing component to eliminate these flows.

The simulations showed that the first step reduced reverse flows and balanced the airflow distribution, while the second step completely removed reverse flows.

Further analysis indicated that the improved design reduced acoustic sound power and turbulence intensity, leading to more efficient motor performance. The optimized design resulted in a 2.7 dB(A) reduction in sound pressure level and a 10.52% decrease in power consumption compared to the existing design.

The study also compared different sound insulation materials, finding that polyurethane (PU) and polyethylene (PE) foams were less effective than the current insulation, with a 6.4 dB(A) difference in sound pressure levels. Overall, the improved design showed better performance and efficiency, with accurate predictions of airflow and sound levels.

Conclusion

Air purifiers are devices that remove invisible particles such as dirt, bacteria, viruses, and dust from the environment and release clean air. This study examined the airflow within an air purifier with a flow rate of 200 m³/h using CFD simulations. The study aimed to reduce reverse and turbulent flows by modifying the motor position, sound insulation material design, and properties to decrease noise and eliminate reverse flows. Improvements in the design resulted in increased airflow and reduced noise. The optimized model achieved a 2.7 dB(A) reduction in sound pressure level and a 10.5% decrease in power consumption.

A similar study by Lee et al. investigated a home air purifier with a maximum flow rate of 10 m³/min. This study focused on flow separations in the snail-shaped air outlet and found that these separations affected both the air velocity and noise levels, achieving a 4.2 dB(A) reduction in noise.

Another study tested insulation in a purifier with a maximum flow rate of 1500 m³/h and found noise reductions between 3.5 and 9 dB(A). This work also explored different sound insulation materials, revealing a 6.4 dB(A) difference in sound pressure levels between materials.

1. Giriş

Hava kirliliği, genellikle partikül sayısının artışı olarak tanımlanır. İnsan sağlığı için olumsuz etkileri yüksek ve gözle görülemeyecek kadar küçük boyutlarda olan hava kirliliği dış mekân ve iç mekân kirliliği olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Dış mekân kirliliği genel olarak bireysel kontrollerin dışında olup enerji, ulaşım ve tarım gibi sektörlerden hayatımıza karışan ulusal çapta kontroller ve önlemler gerektiren kirliliktir. İç mekân kirliliği ise bireysel olarak kontrollerin ve önlemlerin alınabildiği sınırlı alanlar olmalarına rağmen özellikle çocukların bu kirliliğe daha çok maruz kaldıklarına dair kanıtlar ortaya konmuştur [1]. Artan hava kirliliği ve Covid19 gibi pandemik hastalıkların ortaya çıkması, iç mekân hava temizleme cihazlarının kullanımı yaygınlaştırmıştır. İnsan yaşamının %90'dan fazlasının iç mekânlarda geçtiği düşünüldüğünde ortam temizliği kaçınılmaz hale gelmektedir [2]. Partikül yoğunluğu insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olup, bu partiküllerin boyutlarına göre ölümcül sonuçlara dahi yol açabilir. Bu partiküller havada belirli bir süre asılı

kalabilirken bunlardan hava yoluyla bulaşması kolay olabilenler bakteri, mantar, maya, küf ve virüslerdir [3].

Bir çalışmada, insanların dakikada 6-10 L ve günlük ortalama 1,5 · 10⁴ L hava soluduğu belirtilmektedir. Diğer bir açıdan bakıldığında sağlıklı bir insan vücudunun tüketmesi gereken 2 L sıvının 7500 katıdır [4]. Günlük solunan 1,5 · 10⁴ L hava ile havada bulunan 300'den fazla uçucu partikül insan vücuduna nüfuz etmekte ve bu partiküllerin baş-göz ağrısı, koku alma duyusunda azalma, uyusukluk ve kanser gibi sağlık sorunlarına yol açtığı belirtilmektedir. Porto şehrinde bulunan bir anaokulunda iç mekân ve dış mekânda dört farklı Partikül Madde (PM) sınıfında - PM₁-PM_{2.5}-PM₁₀-PM_{Total} - ölçümler yapıp hava kalitesi incelenmiştir. İç mekânda yapılan ölçümler, 3 farklı sınıf ve 1 yemekhane için hem hafta içi hem de hafta sonu boyunca yapılmış ve elde edilen veriler detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, odadaki hava kalitesinin Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından belirlenen seviyenin altında olduğunu göstermiştir. Ayrıca, A sınıfında yapılan çalışmada hafta içinde sınıfta bulunan havanın kalitesinin daha kötü ve partikül miktarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [5]. Burada

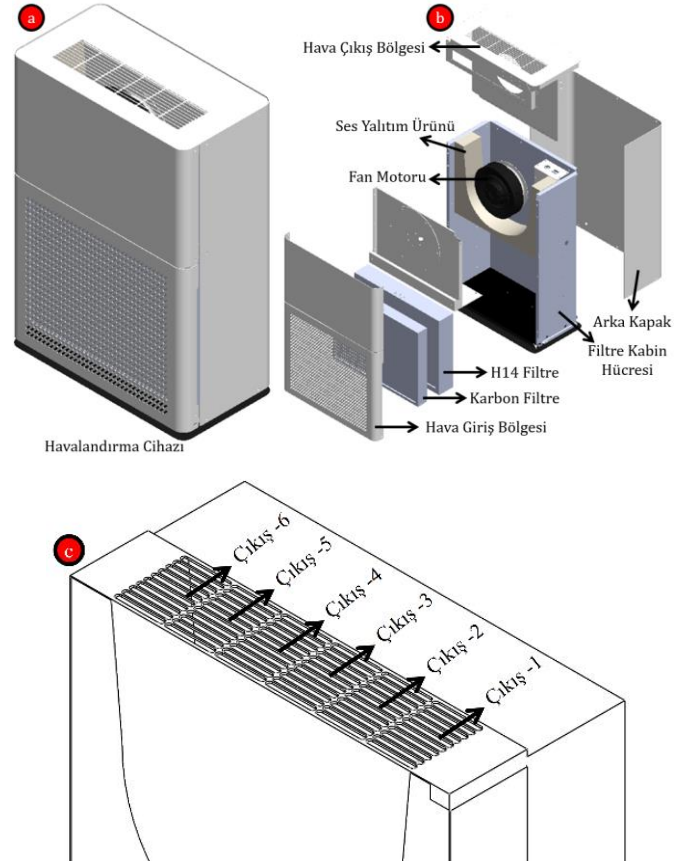
bahsedilen PM diğer bir adıyla aerosol ölçümleri herkes tarafından bilinen ve kabul gören bir sistem olup partiküllerin boyutuna göre sınıflandırılır. Genelde kullanılan 4 farklı PM ölçümü bulunmakta ve sırasıyla $PM_{0,1}$ - PM_1 - $PM_{2,5}$ - PM_{10} 'dur. Örneğin PM_{10} , partikülün 10 mikrometre çapından daha düşük olduğunu ifade eder. Çap oranı düştükçe insan sağlığına zararı daha fazla olmakta ve nefes almak gittikçe zor hale gelmektedir [6]. İnsan vücudu, nefes alma ve verme esnasında zararlı partikülleri tutma yeteneğine sahiptir. Ancak 2,5 mikrometreden daha küçük olan partiküllerin tutulma oranı daha düşüktür, bu da solunum yoluyla vücuda daha fazla nüfuz etmelerine neden olur. Bu nedenle çalışmalarda genel olarak $PM_{2,5}$ incelenmektedir [7]. Bahsedilen olumsuz durumlara çözüm bulabilmek için hava kalitesini arttırmaya yönelik çalışmalar giderek yaygınlaşmaktadır. Farklı çaplarda havada asılı kalabilen partikülleri filtreleyen hava temizleme cihazları geliştirilmektedir. Doğru kullanım sağlandığı zaman hava temizleme cihazları iç mekânda bulunan virüs ve bakteriler gibi zararlı mikroorganizmaları yok etmeye yardımcı olmaktadır. Hava temizleme cihazları sayesinde Covid19, bakteri, virüs gibi hastalık yayan zararlı mikroorganizmaların temizlenmesi sağlanırken, hastalıktan korunmak için tek başına yeterli bir cihaz olmadığı bilinmektedir. Bu cihazlar, hava temizliğine ek bir katkı sağlarken, aynı zamanda sosyal mesafe, maske ve temizlik gibi genel önlemlere de uyulması gerektiğini vurgular. Hava temizleme cihazlarında kirli havayı içinde tutan sistem, filtrasyon sistemi olarak adlandırılmaktadır ve genel olarak içerisinde 3 farklı filtre bulundurmaktadır. Bunlar havanın geliş yönüne göre ön filtre (F8), karbon filtre ve HEPA filtre (H14)'dir. Yapılan bir çalışmada hangi filtrasyon sisteminin daha avantajlı olduğu araştırılmış ve iç mekânlar için pratik, UV ışını içermeyen ve yüksek voltaj bulundurmayan çok katmanlı cam elyaf yapıda %99,97 verimlilik vaat eden HEPA filtrelerin en avantajlı konumda olduğu vurgulanmıştır [7]. Ortamdaki partikülleri kendi içine çekip ortamı temizleyen bu cihazların sağlıklı ve hasta insanların sağlığına etkisi farklı çalışmalarca incelenmiştir. 2 grup üzerinde yapılan bir çalışmada bir gruba gerçek hava temizleme ve diğer gruba sahte hava temizleme cihazı verilmiştir. İç mekânda 32 kişinin bulunduğu ortamda yapılan deneylerde gerçek hava temizleme cihazının ortamda bulunan $PM_{2,5}$ partikül göstergesini %11 düşürdüğünü gözlemlenmiştir. 32 birey üzerinde gözlemlenen diğer sonuç ise hava temizlemenin insan sağlığını iyileştirme yönünde herhangi bir etkisinin olmadığıdır [8]. Yaşlı bireylerin bulunduğu bir ortamda yapılan hava temizleme deneylerinde, bireylerde bulunan kardiyovasküler ve pulmoner fonksiyonlarının iyileştiği gözlemlenmiştir [9]. Hava temizleme cihazları çalışırken bir yandan da insan kulağını rahatsız etmeyecek düzeyde ses çıkarmaları söz konudur. Kullanılan fan motoruna, filtre tiplerine, yalıtıma ve kabine göre ses basınç seviyeleri değişkenlik göstermektedir. Kim ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada fan motoru kanatlarının oluşturduğu ses basınç seviyesini azaltmak için kanatlar üzerinde optimizasyon çalışması yapılarak ses seviyesinin 4,5 dB(A) düştüğü tespit edilmiştir [10]. Lee ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada mevcut hava temizleme cihazının fan motoru bölgesinde bulunan salyangoz yapının tasarımı hava çıkış bölgesinde akış ayrılmalara ve dolayısıyla çıkış bölgesinde oluşan hava hızının azalmasına sebebiyet verdiği görülmüştür. HAD sayısal çalışmalarıyla iyileştirilen salyangoz yapının tasarımı değiştirilmesiyle akış ayrılmalara minimum düzeye indirgenmesi, hava çıkış hızlarının arttığı ve 4,2 dB(A) ses seviyesinde azalma gerçekleştiği tespit edilmiştir [11].

Bu çalışma kapsamında mevcutta bulunan 200 m³/h hacimsel debimetre kapasitesi bulunan, 3 farklı çalışma kademesi olan bir hava temizleme cihazının çıkış bölgesinde tespit edilen tersinir

akışların giderilmesi ve cihaz içerisinde havanın oluşturduğu girdabın minimuma indirilmesi amaçlanmıştır. Hem deneysel hem de HAD sayısal yöntemiyle tespit edilen tersinir akış ve girdaplar, motor üzerinde bir baskı oluşturmaktadır. Bu durum cihazın daha fazla güç çekmesine sebebiyet verirken Ses Basınç Seviyesini (SPL) arttırmaktadır. HAD sayısal yöntemleri ile tespit edilen tersinir akış ve türbülansların motorun konumu ve ses yalıtım malzemesinin geometrisi değiştirilerek giderilmesi hedeflenmiştir. İyileştirilmiş geometri üzerinde 3 farklı ses yalıtım malzemesi montajlanarak ses seviyesi test edilmiş ve en iyi yalıtım malzemesine karar verilmiştir. Mevcut duruma göre ses seviyesinde 2,7 dB(A) azalma ve güç seviyesinde %10 kazanç elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Hava temizleme cihazlarının kapasitesi temizlediği oda büyüklüğü ile ifade edilirken çalışma kapsamında ele alınan 2,5 m tavan yüksekliğine göre 80 m² bir odayı temizleyen mevcut temizleyici Şekil 1a'da gösterilmiştir. Ana hat ölçüleri 230 x 440 x 636 mm olan cihazın genel bileşenleri hava giriş bölgesinden hava çıkış bölgesine doğru sırasıyla şu şekildedir: Hava giriş bölgesi, karbon filtre, H14 filtre, filtre kabin hücresi, fan motoru, strafor, arka kapak ve hava çıkış bölgesi. Şekil 1c'de ise hava çıkış bölgesinin 6 farklı alana ayrıldığı gösterilmektedir.

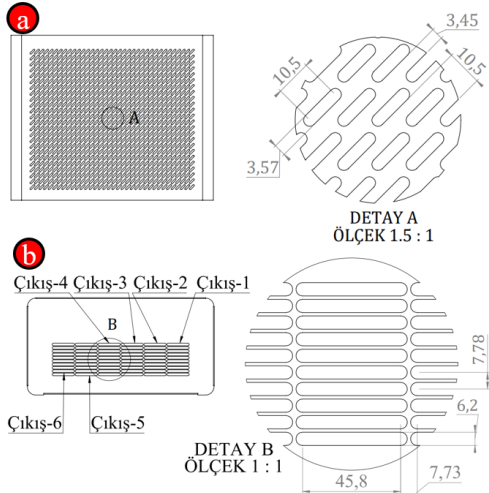


Şekil 1. a) Hava temizleme cihazı b) Önemli bazı bileşenleri c) Hava çıkış bölgeleri

Figure 1. a) Air purifier b) Some important components c) Air outlet regions

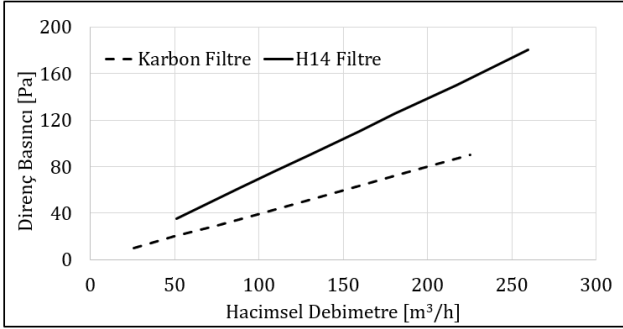
Hava giriş bölgesi teknik detayı Şekil 2a'da verilen yapıdan oluşurken hava çıkış bölgesi ise teknik detayı Şekil 2b'de verilen 6 farklı çıkışa bölünmüş bir yapıdan oluşmaktadır. Giriş bölgesinden sonra karbon filtre ve H14 filtre gelirken filtrelerin basınç debi grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre filtreler

sırasıyla 200 m³/h debide motora 80 Pa ve 139 Pa direnç basıncı oluşturmaktadır.



Şekil 2. a) Hava giriş bölgesi b) Hava çıkış bölgesi

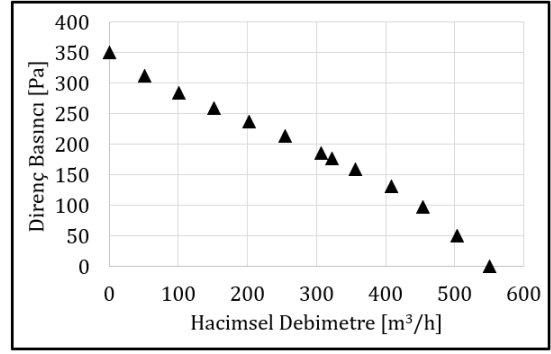
Figure 2. a) Air inlet region b) Air outlet region



Şekil 2. Karbon filtre ve H14 filtrenin direnç basıncı-hacimsel debimetre grafiği

Figure 3. The pressure drop-volumetric flow rate graph for Carbon filter and H14 filter

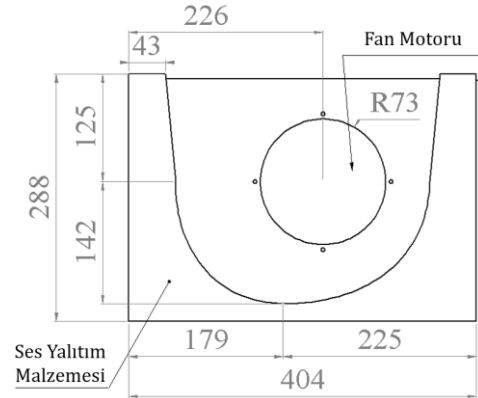
Filtre kabin hücresi, hava akışının geçtiği bölge olarak adlandırılırken içeride bulunan havanın sızdırmazlığı için önemli bir bileşen konumundadır. Filtreleri içinde bulunduran filtre kabini gelen tozu, kiri, bakteriyi ve virüsü taşıyan havanın bir bütün şekilde filtrelere yönelmesini sağlar. Filtrelere gelen kirli hava temizlendikten sonra hava çıkış bölgesine doğru yönelmektedir. Hava temizleme cihazlarının temizleme kapasitesi kullanılan filtreleme sistemine ve filtre özelliklerine bağlıken bu çalışmada kullanılan ISO 29463 ile uyumlu olan H14 filtre 0,1 µm'na kadar düşük boyuttaki partikülleri bile %99,95 oranında temizleme kapasitesine sahiptir [12]. Kirli havanın filtrelere çekilmesini sağlayan ve filtrelerin oluşturduğu basıncı yenerek temiz havayı çıkış bölgesine taşıyan önemli diğer bileşen ise fan motorudur. Havanın oda içerisindeki dağılımını sağlayan fan motoru ve kirli havayı içinde tutan filtrelerin seçimi birlikte yapılmalıdır. Fan motorunun, filtrelerin oluşturduğu direnç basıncını yenebilmesi ve gelen havayı çıkışa yönlendirebilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan filtrelerin fan motoruna uyguladığı direnç basıncı Şekil 4'te kullanılan fan motoru bu dirence karşı koyabilecek kapasitededir. Deneysel verilerle oluşturulan ve Şekil 4'te verilen direnç basıncı-hacimsel debimetre grafiğine göre, hava temizleme cihazının 200 m³/h debi üretebilmesi için filtrelerin oluşturduğu direnç basıncının en yüksek 236 Pa olması gerekmektedir.



Şekil 4. Fan motoru direnç basıncı-hacimsel debimetre grafiği

Figure 4. The pressure-volumetric flow rate graph for the fan motor

Hava temizleme cihazının önemli son bileşeni ise fan motoru bölgesinde bulunan genişmiş polistiren malzemesinden oluşan ses yalıtım ürünüdür. Fan motoru bölgesinde bulunan saca montajlanan ses yalıtım ürününe çarpan hava sesi sönmelenmekte ve bu ses yalıtım ürünü cihazın ses seviyesini belirlemede kritik bir öneme sahiptir. Ses yalıtım ürünün geometrik detayı ve fan motorunun ses yalıtım ürününe göre konumu Şekil 'te verilmiştir. Çalışma kapsamında hem fan motorunun konumu hem de ses yalıtım ürünün geometrik yapısı HAD sayısal çalışmasında iyileştirilerek aynı hacimsel debimetrede oluşan türbülans şiddetinin, hava çıkış bölgesindeki tersinir akışın ve ses basınç seviyesinin azaltılması hedeflenmiştir.



Şekil 5. Mevcut ses yalıtım malzemesinin teknik detayı ve fan motorunun cihaz içerisindeki konumu

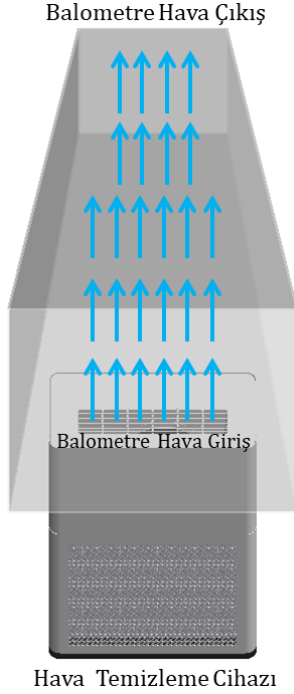
Figure 5. The technical details of current sound insulation material and position of the fan motor inside of the air purifier

2.1. Deney test düzeneği

Hava temizleme cihazlarında aranan en önemli iki özellik debi kapasitesi ve ses basınç seviyesidir. Debi seviyesi kullanılabilir oda boyutunu ve temizleme kapasitesini ortaya çıkarırken, ses seviyesinin ise insan kulağını rahatsız etmeyecek düzeyde olması beklenmektedir. İstenen özelliklerin karşılanabilmesi ve incelenmesi adına hacimsel debimetre ve ses basınç seviyesi deneyleri yapılmıştır.

Hacimsel debimetre deney düzeneği Şekil 6'da gösterilmekte ve cihaz üzerine balometre konumlandırılarak geçen havanın debisi ölçümlenebilmektedir. Balometrenin boyu, EN 16211-2015 standartlarına göre hava temizleme çıkış hidrolik çapının en az 3 katı kadar olmalıdır (çalışma kapsamında 100 mm). Kullanılan balometrenin hava giriş ölçüleri 610 x 610 mm ve hava çıkış ölçüleri 360 x 360 mm'dir. Ayrıca 50-4000 m³/h debi değerleri

arasında ölçüm yapabilmekte ve ölçülen değerin %3'ü kadar hassasiyetle çalışmaktadır. Balometrenin hava çıkışında bulunan 16 adet pitot tüpü ile havanın toplam basıncı denklem (1)'e göre ve hızı denklem (2)'ye göre tespit edilirken izentropik akış denklemleriyle (3)-(7) bilinen hava basıncı ve hızı sayesinde havanın Mach sayısı, ses hızı, sıcaklığı ve debisi hesaplanabilmektedir [13].



Şekil 6. Hacimsel debi ölçüm deney düzeneği

Figure 6. Volumetric flow rate measurement experimental setup

$$p = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot p_d / \rho} \quad (2)$$

$$p_s / p_t = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\gamma / (\gamma - 1)} \quad (3)$$

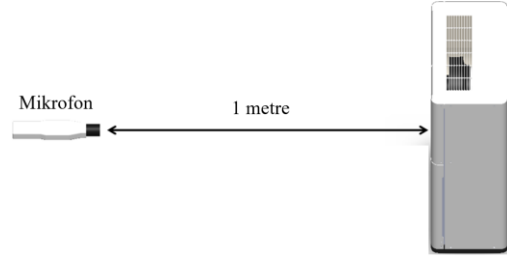
$$M = v / a \quad (4)$$

$$a = \sqrt{\gamma R T} \quad (5)$$

$$p / p_t = (T / T_t)^{\gamma / (\gamma - 1)} \quad (6)$$

$$m = \rho v D \quad (7)$$

Çalışma kapsamında yapılan diğer deney düzeneği ses basınç seviye testidir. Ses testleri 32 dB(A) olan bir odada gerçekleştirilmiş ve Şekil 7'de deney düzeneğine yer verilmiştir. Deneyler ISO 3744 standardına göre cihazın 1 metre önüne mikrofon yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Standartta göre en az 4 adet mikrofonun cihaz etrafına konumlandırılması gerekirken şartlar gereği ölçüm hassasiyeti ± 3 dB(A) olan 1 adet mikrofonla deneyler gerçekleştirilmiştir. Kim ve ark. tarafından geliştirilen hava temizleme cihazının ses basınç seviyesini tespit etmek için yapılan deneyler sessiz ve yankı yapmayan bir odada cihazın önünden tek mikrofonla ölçülerek yapılmıştır [10].



Şekil 3. Ses basınç seviyesi ölçüm deney düzeneği

Figure 7. Sound pressure level measurement experimental setup

2.2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayısal çalışması

Çalışmada kullanılan hava temizleme cihazının iyileştirme çalışmalarını daha az prototip maliyeti ile ilerletmek ve elde edilebilecek en iyi geometriyi kısa sürede tespit edebilmek için bilgisayar ortamında SWFS ticari yazılımı kullanılarak HAD sayısal çalışmalarından yararlanılmıştır. HAD sayısal çalışması için deneysel çalışması tamamlanan hava temizleyicinin CAD modeli hazırlanır. Modelde cihazın sızdırmaz olduğu kabul edilerek akışın geçtiği alanları değiştirmeden ve sonucu etkilemeyecek şekilde geometride basitleştirmeye gidilir. Deneysel çalışma ile yaklaşık olarak aynı sonuçları alabilmek için SWFS ticari yazılımında akışkan modeli olan hava temizleme cihazına kartezyen ağ yapısı uygulanır. SWFS, sıvı ve katı hacimleri üç boyutlu dikdörtgen hücrelere bölerek ağ yapısını oluşturur ve buna sonlu hacim (FV) yöntemi denmektedir. Akışkanın bulunduğu dikdörtgen hücrelerde Navier-Stokes (NS) denklemleri çözülürken sonlu hacim yöntemi her akış hücresinde kütle, momentum ve enerji dengesi kurar ve sırasıyla (8), (9) ve (10) denklemleri çözülür [14].

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial (p u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial (p u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (p u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial p H}{\partial t} + \frac{\partial p u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_h \quad (10)$$

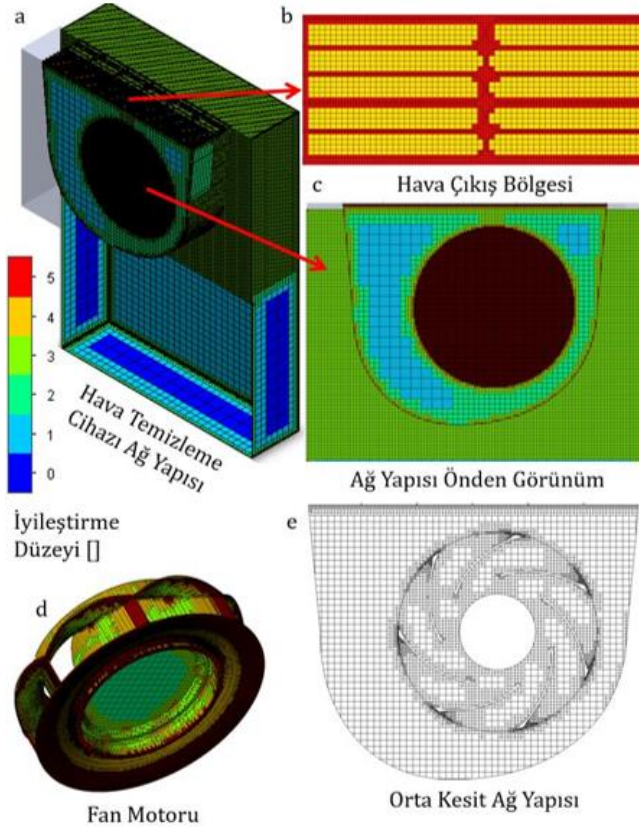
$$\text{burada } H = h + \frac{u^2}{2}$$

Kartezyen ağ yapısında ana konu, kaba ağ yapısında bulunan sınır katmanların çözülmesidir. SWFS bu noktada özgün bir yaklaşım sergilemektedir ve duvardaki yüzey sürtünmesini ve ısı akışını hesaplayabilmek için Prandtl sınır tabaka yaklaşımı kullanır. Bu yaklaşım, HAD sayısal çalışmanın temelini oluşturan duvar fonksiyonu yaklaşımlarıyla benzerdir. Sınır tabakası çözümünü kitlesel akış ile birleştirmek için iki yöntemden oluşan İki Ölçekli Duvar Fonksiyonu (2SWF) kullanılır

1. Akış ve termal profillerin oluşumu için eleman sayısı yeterli değilse ince sınır tabaka işlemi uygular.
2. Sınır tabaka profillerinin çözümü için katman boyunca kullanılan ağ yapısı gerekenden fazla ise kalın bir sınır katmanı yaklaşımı uygulanır [14].

Bu çalışmada uygulanan kartezyen ağ yapısı Şekil 8'de gösterilmiş olup ağ yapısının iyileştirme düzeyi SWFS programına göre 0-5 arasında verilmiştir. 4. dereceden uygulanan ağ yapısında ileri kanal iyileştirme özelliği aktif

edilmiştir. Şekil 8a'da hava temizleme cihazının genel görünümü verilmiş olup iç kabin bölgesinin ağ yapısı net görünmektedir. Şekil 8'de sırasıyla, hava temizleme cihazı ağ yapısı, hava çıkış bölgesi, ağ yapısının önden (kesitten) görünümü, fan motoru ağ yapısı ve orta kesit ağ yapısı detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. a) Mevcut hava temizleme cihazı genel ağ yapısı b) Hava çıkış bölgesi c) Önden görünüm d) Fan motoru e) Fan motoru bölgesi orta kesit ağ yapısı

Figure 8. a) General mesh structure of the current air purifier b) Air outlet region c) Front view d) Fan motor e) Mid-section mesh structure of the fan motor region

HAD sayısal çalışmanın deney sonuçları ile karşılaştırılabilir olması için deneyde uygulanan sınır koşullarının tespit edilmesi ve HAD sayısal çalışmaya uyarlanabilmesi gerekmektedir. Hava temizleme cihazı iç mekânlarda çalıştırıldığı için hem hava giriş bölgesi hem de hava çıkış bölgesi 101325 Pa ve 20 °C olarak tanımlanmıştır. Fan motorunun gerçek modeli çalışmada kullanılmış olup 2000 RPM olarak tanımlanmıştır. Sistemde bulunan filtrele gözenekli ortam tanımlaması yapılarak Şekil 3'te gösterilen basınç-debi grafikleri tanımlanmıştır. HAD sayısal çalışmada zamandan bağımsız akış yöntemi uygulanmış ve yer çekiminin etkisi sistemde aktiftir. SWFS ticari yazılımında bulunan k-ε RANS türbülans modeli çalışmada kullanılmıştır. Bu model Lam ve Bremhorst tarafından önerilen laminar, türbülanslı ve geçişli akışkanlarda tercih edilmektedir [14]. Aynı zamanda hava temizleme cihazları için yapılan çalışmalarda kullanılmış ve doğrulanmış bir modeldir [15]. Akışta meydana gelen türbülans enerjisi, kinetik enerjisi ve enerji transferini hesaplamak için etkilidir. Türbülans kinetik enerjisi (k) akış içindeki türbülansın hareketlilik seviyesini temsil ederken türbülans dissipasyonu (ε) kinetik enerjinin türbülans tarafından nasıl harcandığını, yani türbülansın enerji kaybını ifade eder. Bu iki değişken kullanılarak türbülansın davranışı tahmin edilmeye çalışılır. Denklem (11) ve (12)'de k ve ε ifadeleri sırasıyla

yazılmıştır. Denklemlerde geçmekte olan difüzyon terimleri, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans viskozitesi sırasıyla denklem (13), (14), ve (15)'te ifade edilmiştir. Bu modelde R=0, $C_{1ε} = 1,44$, $C_{2ε} = 1,92$, $C_μ = 0,09$, $σ_k = 1,0$ ve $σ_ε = 1,3$ olarak bilinmektedir.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (12)$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\epsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (13)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (14)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (15)$$

SWFS akustik güç şiddeti tahmini için Proudman formüllerini kullanır ve türbülansın oluşturduğu ses basıncının tahmin edilmesine olanak sağlar. Akustik güç denklem (16) kullanılarak hesaplanır.

$$P_A = \alpha \rho_0 \frac{u^3 l^5}{l a_0^5} \quad (16)$$

Burada u, l ve a_0 sırasıyla türbülans hızı, türbülans uzunluğu ve ses hızıdır. α denklem (16)'daki model sabitidir. k ve ε ifadesinden yazıldığında denklem (17) oluşmaktadır.

$$P_A = \alpha_\epsilon \rho_0 \epsilon M_t^5, \quad \text{burada } M_t = \frac{\sqrt{2k}}{a_0} \quad (17)$$

Akustik gücün dB cinsinden ifade edilmesi için denklem (18) kullanılır.

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right), \quad P_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (18)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Mevcut hava temizleme cihazı üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve HAD sayısal çalışmaları karşılaştırılmış, türbülanslı ve tersinir akışın olduğu bölgeler tespit edilmiştir. HAD sayısal çalışmasında iyileştirme çalışmaları yapılarak nihai ürün elde edilerek deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır. Elde edilen ürün ile mevcut ürün arasındaki farklar ortaya konarak alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

3.1. Mevcut üründe yapılan deneysel ve HAD sayısal çalışmaları

Hava temizleme cihazına uygulan deneysel testlere göre 200 m³/h debi üretmektedir. Cihazın oluşturduğu ses basınç seviyesi 54,5 dB(A)'dır. 50 Hz - 230 Volt'ta çalışırken 38 W güç tüketimi gerçekleştirmektedir.

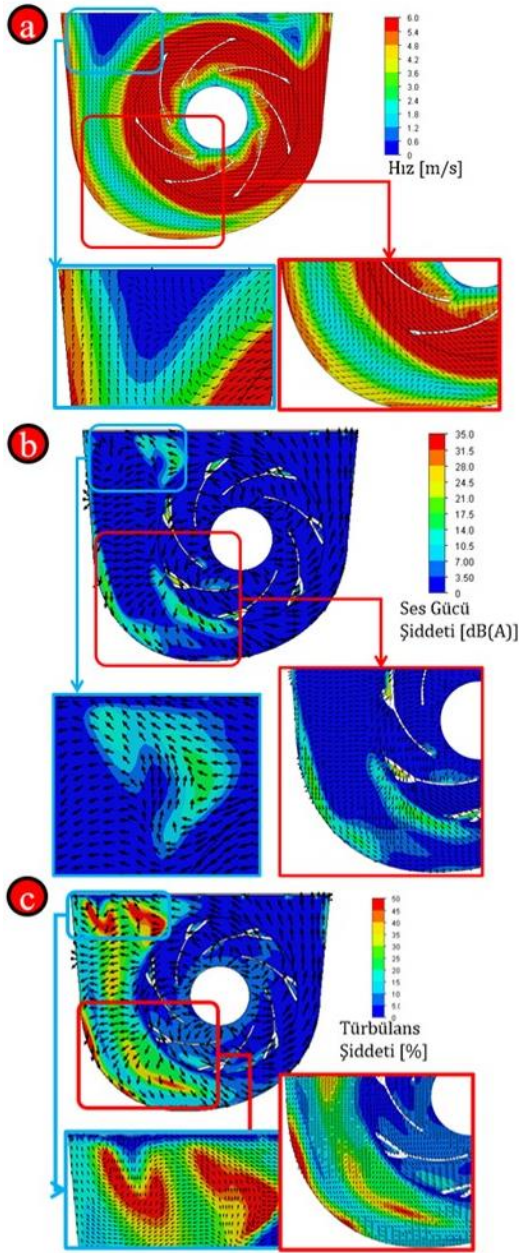
Tablo 1. Deneysel çalışma test sonuçları

Table 1. Experimental study test results

Hacimsel Debimetre [m ³ /h]	200
Ses Basınç Seviyesi [dB(A)]	54,5
Güç Tüketimi [W]	38

Deney ortamı, ağ yapısı ve sınır şartlarından bahsedilen hava temizleme cihazının HAD sayısal çalışmasının sonuçları Şekil

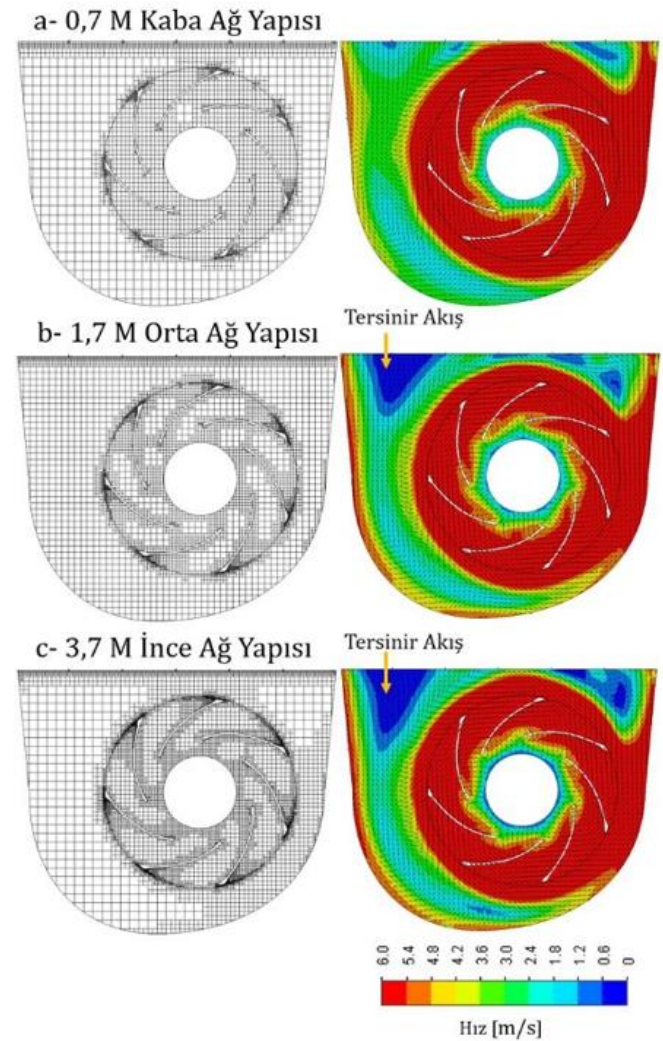
9'da sırasıyla hız konturu, akustik ses gücü ve türbülans şiddeti verilmiştir. Cihaz içerisinde oluşan akışın 0-6 m/s aralığındaki hızı Şekil 9a'da paylaşılmıştır. Fan motoru saat yönünün tersinde dönerken cihazın sağından kuvvetli bir hava çıkışı gözlemlenmektedir. Fakat cihazın sol tarafında tersinir akışlar tespit edilmiştir. Bu sebeple Şekil 1c'de gösterilen hava çıkış bölgesi 4'ten sonrasında hava hızı azalırken motorun daha düşük çalışma hızlarında bazı çıkış bölgelerinden içeri giren akış tespit edilmektedir. Ses gücü şiddetinin 0-35 dB(A) aralığında cihaz içerisinde akışkana bağlı konturu Şekil 9b'de verilmiştir. Buna göre hem tersinir akışın olduğu çıkış bölgesinde hem de cihazın sol iç bölgesinde akışkana bağlı ses oluşumu tespit edilmiştir. Şekil 9c'de ise %0-50 aralığında türbülans konturu paylaşılmış ve cihaz içerisinde oluşan tersinir akışkanın olduğu sol tarafta, sağ tarafa göre daha fazla türbülans olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. a) Hız dağılımı b) Ses gücü şiddeti c) Türbülans şiddeti

Figure 9. a) Velocity distribution b) Sound power level c) Turbulence intensity

Elde edilen HAD sayısal çalışma sonuçlarının doğruluğunun ağ yapısına bağlılığı ayrıca incelenmiş olup kaba, orta ve ince olmak üzere 3 farklı ağ yapısı üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'un sol tarafında görünen ağ yapıları fan motoru bölgesinin orta kesitinden alınmıştır. Sağ tarafta ise ilgili ağ yapısında oluşan 0-6 m/s aralığındaki hız konturu paylaşılmıştır. Yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla 0,7 M – 1,7 M – 3,7 M eleman sayısında yapılan çalışmalardan 1,7 M ve 3,7 M hız konturları arasındaki fark azdır. Diğer bir taraftan Tablo 2'deki sonuçlarda ince ağ yapısı orta ağ yapısına göre %2,6 fazla debi sağlarken kaba ağ yapısında bu oran orta ağ yapısına göre %7'dir. İnce ağ yapısı orta ağ yapısına göre hava çıkış hızını %0,65 daha az tahmin ederken kaba ağ yapısı orta ağ yapısına göre %1,63 daha fazla tahmin etmektedir. Hız konturlarında oluşan dağılım dikkate alındığında orta ağ yapısı çalışma kapsamında seçilmiştir. Seçilen ağ yapısından elde edilen hacimsel debi ile deneyde ölçülen hacimsel debi arasında ise %4,0 fark bulunmuş ve çalışma kapsamında uygun görülmüştür.



Şekil 10. Kaba, orta ve ince ağ yapısı ve ilgili ağ yapısında oluşan hız dağılımı

Figure 10. Coarse, medium, and fine mesh structure and the velocity distribution generated in the corresponding mesh structure

Tablo 2. Kaba, orta ve ince ağ yapısında elde edilen hacimsel debimetre ve hava çıkış hızı sonuçları

Table 2. Volumetric flow rate and air outlet velocity results obtained from coarse, medium, and fine mesh structures

Ağ Yapısı	Kaba	Orta	İyi
Eleman Sayısı	0,7M	1,7M	3,7M
$\dot{V}_c, m^3/h$	205,5	192	197
$v_c, m/s$	3,12	3,07	3,05

Tablo 3. Mevcut tasarımda deney ve HAD sayısal çalışmasının çıkış hızları karşılaştırması

Table 3. Comparison of the outlet velocities between the experimental and CFD simulation study in the current design

Hız [m/s]	v_{c1}	v_{c2}	v_{c3}	v_{c4}	v_{c5}	v_{c6}
Deney	4,2	2,8	3,2	3,1	2,0	3,1
HAD	4,4	2,6	3,4	3,3	2,1	2,8
% Hata	4,8	7,1	6,3	6,5	5,0	9,7

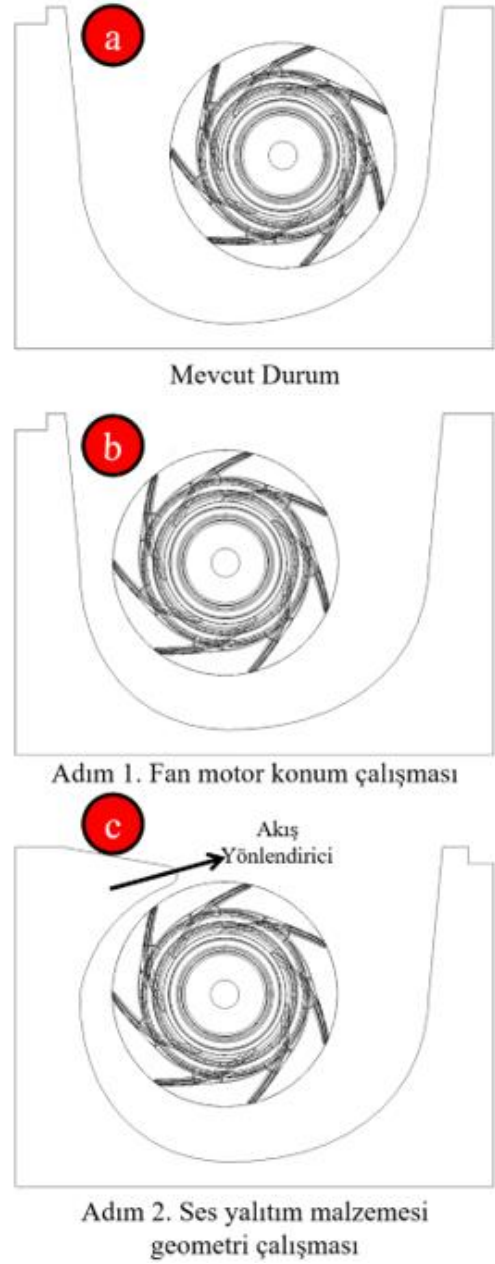
Seçilen orta ağ yapısında HAD sayısal çalışmanın hava temizleme cihazının çıkış bölgesinde elde edilen hız değerleri deneyde elde edilen çıkış hızları ile karşılaştırılmış ve Tablo 3'te paylaşılmıştır. Buna göre HAD sayısal çalışması deneysel verilere göre maksimum %9,7 ve minimum %4,8 arasında tahmin dağılımı göstermektedir.

Şekil 10'da oluşan bütünsel hız dağılımı ve Tablo 3'te bulunan çıkış hızı değerleri incelendiğinde cihazın sağ tarafında hava akışının kuvvetli olduğu fakat sol tarafında zayıfladığı görülmektedir. Türbülanslı ve tersinir hava akışının giderilmesi için yazarlar tarafından hızlı ve pratik 2 adımlı bir yol önerilmiştir. Motor saat yönünün tersinde dönerken sağa doğru kuvvetli hava göndermektedir ve bu sebeple ilk adımda fan motorunun konumu simetrik değiştirilerek Şekil 11b'de gösterildiği gibi sola kaydırılmıştır. Şekil 12-14 arasında elde edilen sonuçlara göre ikinci bir adım önerilerek ses yalıtım ürününün tasarımında iyileştirme yapılarak Şekil 11c'de belirtilen salyangoz tipi akış yönlendirici tasarım ortaya konmuştur.

Adım 1 ve Adım 2 çalışmasında yer alan tasarımların HAD sayısal çalışması sonuçları Şekil 12-14'te sırasıyla hız, akustik ses gücü ve türbülans şiddeti olarak verilmiştir. Şekil 12'de Mevcut durumdan Adım 1'e geçerken cihazın solunda görülen tersinir akışlar azalmış ve cihazın sağında ise hız değerleri artmıştır. Fan konumunun değişmesi ile hava temizleme cihazının iç bölgesindeki hız dağılımı daha dengeli duruma gelmiştir. Cihazın sol tarafında tersinir akış bölgesel olarak kendini göstermektedir. Adım 2 çalışmasında akış yönlendirme tasarımı ile tersinir akış etkisi hava temizleme cihazının orta kesitinde tamamen yok olduğu gösterilmektedir.

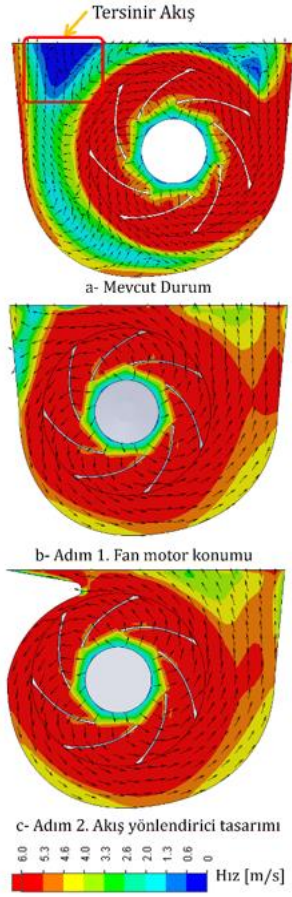
Şekil 13'te gösterilen akustik ses gücü sesin kaynağını tahmin etmekte ve mevcut duruma göre her iki geometride de iyileşme göstererek azalmıştır. Diğer önemli bir nokta ise Şekil 14'te hava

temizleme cihazı içinde tersinir akışın olduğu bölgelerde görülen türbülans şiddeti mevcut duruma göre iyileştirme çalışmalarında azalma göstererek motor üstünde oluşan ekstra yükü alarak motorun daha az yük altında çalışmasını sağlamıştır.



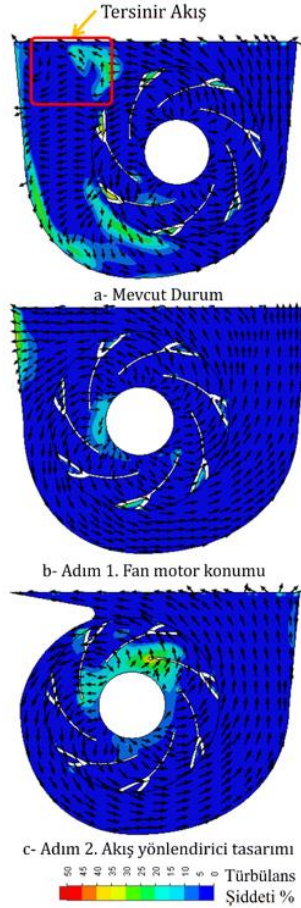
Şekil 11. a) Mevcut hava temizleme cihazı ses yalıtım ürünü ve fan motoru konumu b) Adım 1. Fan motoru konum değişimi c) Adım 2. Ses yalıtım ürünü akış yönlendirici tasarımı

Figure 11. a) Current air purifier sound insulation product and fan motor location b) Step 1. Fan motor location change c) Step 2. Sound insulation product airflow diverter design



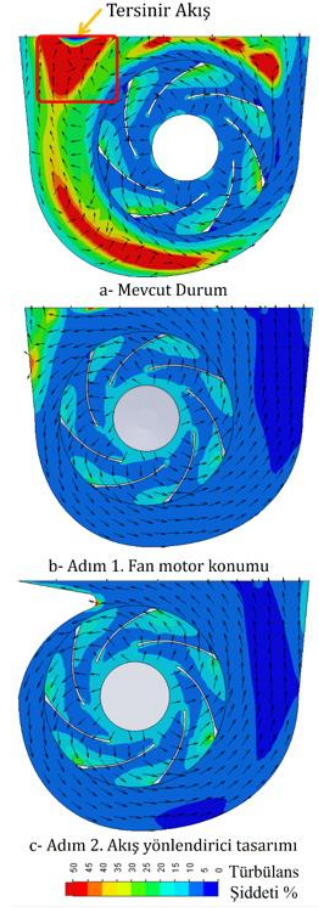
Şekil 12. a) Mevcut b) Adım 1 c) Adım 2 - Hız dağılımı

Figure 12. a) Current b) Step 1 c) Step 2 - Velocity distribution



Şekil 13. Akustik ses gücü - a) Mevcut b) Adım 1 c) Adım 2

Figure 13. Sound power level - a) Current b) Step 1 c) Step 2



Şekil 14. Türbülans şiddeti - a) Mevcut b) Adım 1 c) Adım 2

Figure 14. Turbulence intensity - a) Current b) Step 1 c) Step 2

Adım 2'de oluşan iyileştirilmiş tasarımın ve mevcut tasarımın debi değerleri Deney-HAD karşılaştırması Tablo 4'de verilmiştir. Mevcut çalışmada bu oran %4 ve iyileştirilmiş tasarımda %4,6'dır. Her iki tasarım arasında deneyde hesaplanan %26 ve HAD sayısal çalışmasında hesaplanan %25,3 debi kazancı elde edilmiştir. Cihaz içinde oluşan temiz havayı ortama göndermeye çalışan fan motoru, mevcut durumdaki tasarımdan dolayı hava çıkış bölgesinden hava temizleme cihazının içine hava almaktadır. Bu durum motora ek bir yük oluşturmakta, normal işlevselliğini yitirmekte ve olması gereken performansını düşürmektedir. Tersinir akışlar bu çalışmada da görülebileceği üzere motora ek bir direnç basıncı oluşturmakta ve motorun çalışma verimliliğini düşürmektedir. Adım 2'de tasarlanan iç tasarımı değiştirilen hava temizleme cihazının fan motoru tersinir akışların olmadığı bir ortamda çalıştığı için debi artışı olası bir durumdur.

İyileştirilmiş tasarım için gerçekleştirilen bir diğer Deney-HAD karşılaştırması çıkış hızları için yapılmıştır. Tablo 5'de gösterilen verilere göre çıkış hızı arasındaki hata oranları %12,5 ile %5 arasında değişmektedir.

Tablo 4. Mevcut ve iyileştirilmiş tasarım için deneysel ve HAD sayısal çalışma karşılaştırması

Table 4. Experimental and CFD simulation study comparison for the current and improved designs

	Deney	HAD	% Hata
Mevcut	200	192	4
Adım 2	252	240,5	4,6
İyileşme Oranı %	29	25,3	-

Tablo 5. İyileştirilmiş tasarımda deney ve HAD sayısal çalışmasının çıkış hızları karşılaştırması

Table 5. Comparison of the outlet velocities between the experimental and CFD simulation study in the improved design

Hız [m/s]	$v_{ç1}$	$v_{ç2}$	$v_{ç3}$	$v_{ç4}$	$v_{ç5}$	$v_{ç6}$
Deney	4,8	4,2	3,8	4,1	4,8	4,0
HAD	4,3	3,8	4,1	4,6	5,4	4,2
% Hata	10,4	9,5	7,9	12,2	12,5	5

Hava temizleme cihazında artış gösteren türbülans, basınç değişimi ve akış düzensizliği indirildiğinde fan motoru oluşturduğu havayı sürekli olarak dışarı atmakta ve içeriye dışardan hava almamaktadır. Bu faktörlerin bir araya gelmesiyle fan, daha az enerji kullanarak daha fazla hava üretebilmektedir. Hem mevcut hem de iyileştirilmiş tasarımın çıkış debileri 200 m³/h debiye sabitlendiğinde elde edilen ses basınç seviyesi ve güç tüketim değeri karşılaştırması Tablo 6'da paylaşılmıştır. Buna göre aynı debide 2,7 dB(A) ses basınç seviyesinde azalma ve güç tüketiminde %10,52 kazanç sağlanmıştır.

Tablo 6. Mevcut ve iyileştirilmiş tasarımın aynı debi değerinde ses basınç seviyesi ve güç tüketimi karşılaştırması

Table 6. Comparison of sound pressure level and power consumption for the current and improved designs at the same flow rate

	Mevcut	İyileştirilmiş
Ses Basınç Seviyesi [dB(A)]	54,5	51,8
Güç Tüketimi [W]	38	34

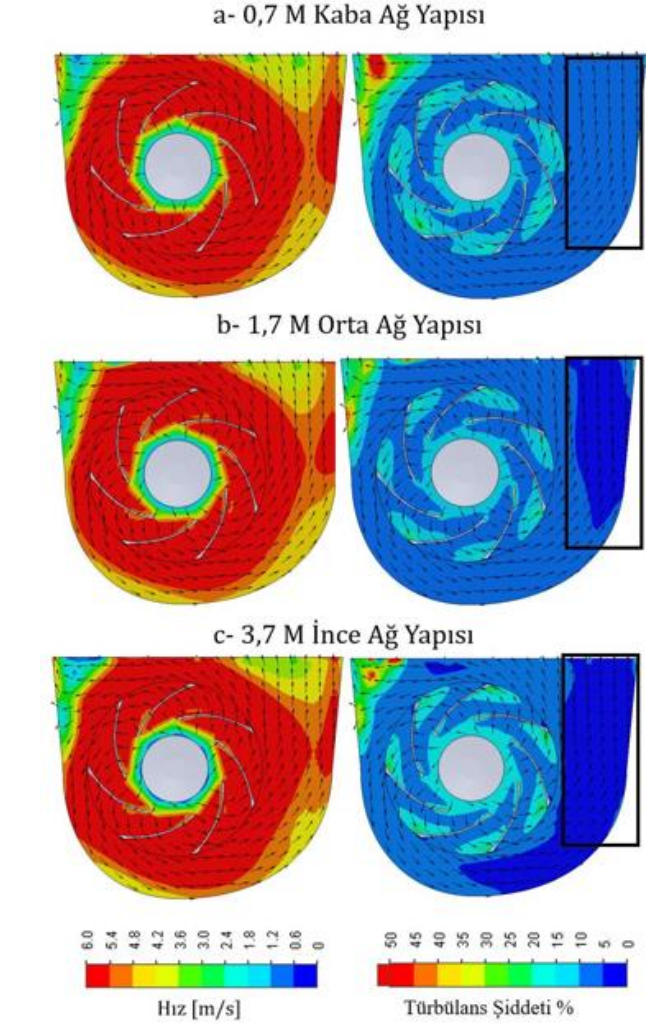
Çalışma kapsamında kullanılan mevcut ses yalıtım ürünü yerine poliüretan (PÜ) ve polietilen (PE) sünger kullanılarak değiştirilmiş ve ses değerleri incelenmiştir. Tablo 7'de paylaşılan verilere göre mevcut ses yalıtım malzemesi hava temizleme cihazı için ideal olduğu tespit edilip mevcut ve PÜ ses yalıtım malzemeleri arasında 6,4 dB(A) ses basınç seviyesi farkı olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 7. Mevcut, PÜ ve PE ses yalıtım malzemelerinin hava temizleme cihazında oluşturduğu ses basınç seviyeleri

Table 7. Sound pressure levels generated by the current, PU, and PE sound insulation materials in the air purifier

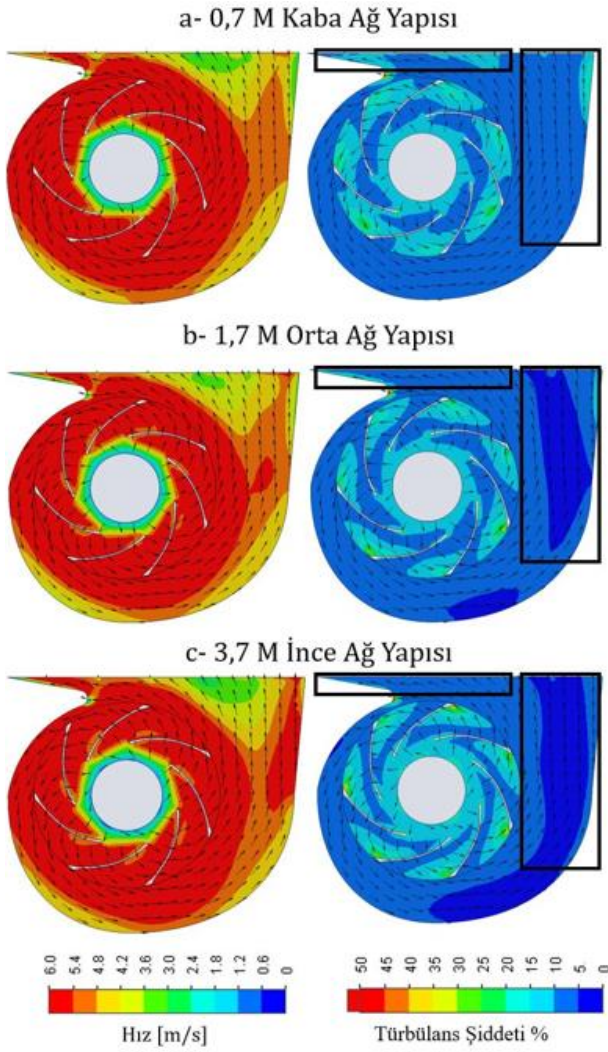
	Mevcut	PÜ	PE
Ses Basınç Seviyesi [dB(A)]	51,8	58,2	54

Ağ yapısından bağımsızlık çalışması mevcut hava temizleme cihazı için uygulanmıştır. Adım 1 ve Adım 2'de tasarlanan hava temizleme cihazlarının HAD sayısal çalışmalarının doğruluğu sunmak adına ağdan bağımsızlık çalışmasının aynısı uyarlanmıştır. Şekil 15'te Adım 1 çalışması için farklı ağ yapılarından elde edilen hem hız hem de türbülans şiddeti konturu paylaşılmıştır. 3 ağ yapısı da hız konturunu aynı şekilde tahmin edebilirken, türbülans şiddetinde 0,7 M eleman sayılı ağ yapısında cihazın sağ tarafı yetersiz kalmış ve 1,7 M - 3,7 M ağ yapılarından daha fazla türbülanslı alan göstermiştir. Aynı şekilde Şekil 16'da Adım 2 için gösterilen tasarım için hız konturları aynı dağılımı sağlarken, cihazın sağında ve çıkışında türbülans konturu 1,7 M ve 3,7 M eleman sayılı ağ yapılarında aynı dağılımı yaklaşık olarak elde edilmiştir.



Şekil 15. Adım 1 tasarımı ağ yapısından bağımsızlık çalışması

Figure 15. Step 1 design mesh independence study



Şekil 16. Adım 2 tasarımı ağ yapısından bağımsızlık çalışması

Figure 16. Step 2 design mesh independence study

4. Sonuçlar

Hava temizleme cihazları ortamda bulunan kir, bakteri, virüs ve toz gibi gözle görülemeyecek partikülleri içine çekip ortama temiz havayı verebilen makinelerdir. Bu çalışma kapsamında 200 m³/h debi üretebilen bir hava temizleme cihazının içinde oluşan akışı HAD sayısal çalışmalarıyla incelenmiştir. Tespit edilen tersinir ve türbülanslı akışkanları indirgenmek için motorun konumu, ses yalıtım malzemesinin tasarımı ve ses yalıtım malzeme özelliği değiştirilerek sesin azaltılması ve tersinir akışların yok edilmesi hedeflenmiştir. İyileştirilmiş model üzerinde gerçekleştirilen hem deneysel hem de sayısal çalışmalara göre çıkış bölgesinde azaltılan tersinir akışın etkisi debinin artışı sağlamıştır. Çalışma kapsamında belirlenen debi miktarına indirgenen iyileştirilmiş tasarım, 2,7 dB(A) ses basınç seviyesi ve %10,5 güç tüketimi kazancı sağlamıştır. Bu çalışmaya en yakın bulunan bir çalışma Lee ve ark. tarafından gerçekleştirilmiş ve maksimum hava debisi 10 m³/dk olan ev tipi bir hava temizleme cihazının motor bölgesinde bulunan salyangoz yapıya benzer hava çıkış bölgesinde tespit edilen akış ayrılmaları incelenmiştir. Bu akış ayrılmaları veya tersinir akışların çıkış hava hızının düşmesine ve ses oluşumuna etkisi olduğu saptanmıştır. Hem salyangoz tasarımından oluşan sese hem de fanın oluşturduğu sese odaklanan bu çalışmada 4,2 dB(A) ses azalması sağlanmıştır [11].

Literatürde bulunan başka bir çalışmada ise maksimum 1500 m³/h debi üretebilen bir hava temizleme cihazında test edilen yalıtımın 3,5 – 9 dB(A) arasında ses basınç seviyesini azalttığı tespit edilmiştir [16]. Bu çalışma kapsamında farklı ses yalıtım malzemeleri ses basınç seviyesinin indirgenmesi araştırılmış ve ses yalıtım malzemeleri arasında 6,4 dB(A) ses basınç seviyesi farkı tespit edilmiştir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma daha önce özet bildiri olarak "2nd International Symposium on Characterization" sempozyumunda "Noise Reduction of Household-Type Air Purifier Device" konu başlığı ile özet sunumu gerçekleştirilmiştir. Yazarlar olarak Ar-Ge merkezi projesi kapsamında gerçekleştirilen "N80 Tipi Hava Temizleme Cihazının Gürültü Kaynaklarının Belirlenmesi" konulu çalışmada Esalba Metal Sanayi A.Ş.'nin sağladığı mali, deneysel ve sayısal çalışmalarda verdiği destekler için teşekkür ederiz. Bu çalışma kapsamında projenin ilerleyişi esnasında fizibilite çalışmasından makalenin yayınlanmasına kadar geçen süre zarfında hem sunuma hem de çalışmaya katkısı olan Ar-Ge Merkezi takım arkadaşlarımız Buse ÇAKIR, Enes Alperen ŞAHİN, Emre AKCAN Muharrem KEYFOĞLU, Aybüke YURDAKUL ve Kader ERDOĞAN'a ayrıca teşekkür ederiz. Son olarak, bu çalışmanın yayım-revizyon sürecinde verdiği destek ve fikirlerinden ötürü Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Hakan GAŞAN ve ekibine teşekkür ederiz.

Yazar katkılarının beyanı

Fatih KIRMIZIGÖL: Yazım, Nümerik Çalışma, Deneysel Çalışma, Araştırma, Fizibilite Çalışması. Fikir Oluşturma, Veri Toplama ve Revizyon

Mehmet UÇAR: Kontrol, Gözden Geçirme, Proje Lideri, Fizibilite Çalışması, Araştırma ve Fikir Oluşturma,

Kaynaklar

- [1] Almeida, S. M. ve diğerleri, 2010. Children Exposure to Atmospheric Particles in Indoor of Lisbon Primary Schools: Atmospheric Environment, Cilt. 45, s. 7594-7599.
- [2] Klepeis, N. E. ve diğerleri, 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, Cilt. 11, s. 231-252.
- [3] Tringe, S. G. ve diğerleri, 2008. The Airborne Metagenome in an Indoor Urban Environment: Plos One, Cilt. 3, s. 1-10.
- [4] Wood, R. A. ve diğerleri, 2002. Plant/Soil Capacities to Remove Harmful Substances from Polluted Indoor Air: The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 4(5), s. 120-129.
- [5] Branco, P. T., Alvim-Ferraz, M. C., Martins, F. G. & Sousa, S. I., 2013. Indoor Air Quality in Urban Nurseries at Porto City: Particulate Matter Assessment. Atmospheric Environment, s. 133-143.
- [6] Fromme, H., 2018. Particulate Matter and Ultrafine Particles in Indoor Air: Encyclopedia of Environmental Health, s. 1-13.
- [7] Roy, A., Mishra, C., Jain, S. & Solanki, N., 2019. A Review of General and Modern Methods of Air Purification: Journal of Thermal Engineering, Cilt. 5, s. 22-28.
- [8] Yoda, Y. ve diğerleri, 2020. Effects of the Use of Air Purifier on Indoor Environment and Respiratory System among Healthy Adults: International Journal of Environmental Research and Public Health, s. 2-11.
- [9] Karottki, D. G., Spilak, M. & Frederiksen, M., 2015. Indoor and Outdoor Exposure to Ultrafine, Fine and Microbiologically Derived Particulate Matter Related to Cardiovascular and Respiratory Effects in a Panel of Elderly Urban Citizens: International Journal of Environmental Research and Public Health, s. 1667-1686.

- [10] Kim, J. S. ve diğeri, 2015. Optimization of Sirocco Fan Blade to Reduce Noise of Air Purifier Using a Metamodel and Evolutionary Algorithm: Applied Acoustics, Cilt. 89, s. 254-266.
- [11] Lee, B., Sim, W., Jo, J. & Chung, J., 2020. Reduction of Flow-Induced Noise in a Household Air Purifier: Journal of Mechanical Science and Technology, Cilt. 34, s. 1-11.
- [12] Saccani, C. ve diğeri, 2022. Experimental Testing of Air Filter Efficiency Against the SARS-CoV-2 Virus: The Role of Droplet and Airborne Transmission. Building and Environment, Cilt. 210, s. 1-12.
- [13] Cimbala, J. M. & Cengel, Y. A., 2006. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications.
- [14] Sobachkin, A. & Dumnov, G., 2013. Numerical Basis of CAD-Embedded CFD. NAFEMS World Congress, s. 1-20.
- [15] Kılıç, M., Mutlu, M. & Saldamlı, İ. H., 2022. Numerical Investigation of an Air Cleaning Device Performance: Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Cilt. 37, s. 2077-2089.
- [16] Üncü, Y. A. & Koçak, O., 2022. Tıbbi Ortamlarda Kullanılan Portatif Hava Temizleme Sistemi: Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt. 10, s. 1725-1735.



Modeling Gravity Gradients from Surface Gravity Anomaly Data

Yüzey Gravite Anomali Verilerinden Gravite Gradyentlerin Modellenmesi

Sibel Uzun * 

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE
 Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: sibel.uzun@omu.edu.tr

Abstract

Gravity gradients are useful to characterize near mass anomalies since they are much more sensitive to short wavelength anomalies than gravitational accelerations. Estimating gravity gradients from surface gravity data is based on numerical implementations of solutions to geodetic boundary value problem for determination of disturbing potential. One of methods to solve this problem is least-squares collocation which is basically based on data and a defined covariance function. This study deals with estimating gravity gradient tensor components from along track surface gravity anomaly data. The Least-Squares Collocation solution is based on a stationary local covariance function defined for the disturbing potential which allows upward continuation of the observations to a desired altitude. The modeling method is evaluated in using Earth Gravitational Model 2008(EGM2008) and real airborne gravity gradiometry data collected over Southern Texas, Oklahoma region. The results show that modeled gravity gradients estimated in both on the ground and at a certain altitude have basically good agreement with EGM08 gradients. Modeled gradients including horizontal components in the east-west direction exhibit some discrepancies in comparison to the airborne gradiometry data, which may be attributed to some measurement errors in the gradient data.

Keywords: Least-squares collocation, Covariance matrix, Gravity gradient tensor

Öz

Gravite gradyentleri kısa dalga boylu anomalilere yerçekimi ivmelerinden daha fazla duyarlı oldukları için yüzeye yakın kütle anomalilerini belirlemede faydalıdır. Gravite Gradyentlerinin yüzey gravite anomalilerinden kestirimi bozucu potansiyelin belirlenmesinde jeodezik sınır değer problemi çözümlerinin sayısal uygulamalarına dayanmaktadır. Bu problemi çözmenin yöntemlerinden birisi temel olarak veriye ve tanımlanan bir kovaryans fonksiyonuna dayanan En Küçük Kareler Kollokasyonudur. Bu çalışma bir profil boyunca verilen yüzey gravite anomali verilerinden gravite gradyent tensör elemanlarının kestirimi ile ilgilidir. En küçük kareler kollokasyon çözümü gözlemlerin istenen bir yüksekliğe yukarı uzanımına imkan veren bozucu potansiyel için tanımlanmış bir durağan yerel kovaryans fonksiyonuna dayanır. Modelleme yöntemi Yer Gravite Modeli 2008 ve Güney Teksas Oklahoma bölgesi üzerinde toplanmış gerçek havadan gravite gradyometri verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, hem yeryüzü üzerinde hem de belirli bir yükseklikte kestirilen modellenmiş gravite gradyentlerinin EGM08 gradyentleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Doğu-batı yönündeki yatay bileşenleri içeren modellenmiş gradyentler, havadan gradyometre verilerine kıyasla bazı uyumsuzluklar göstermektedir; bu durum gradyent verilerindeki bazı ölçüm hatalarına bağlı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Ek küçük kareler kollokasyon, Kovaryans matris, Gravite gradyent tensör

1. Introduction

According to Newton's Law of Gravitation, the gravitational acceleration between two mass points attracting each other attenuates with the inverse of squared distance from attracting point to a source point. The spatial derivatives of the gravitational acceleration, namely gravity gradients, attenuate with the cube of inverse distance from the source point. Since derivatives of a function reveal its local properties, the effect of attenuation with altitude is compensated by differentiation [1]. Therefore, gravitational gradients become more sensitive to shallow structure mass anomalies than gravity [1]. As such, they have become useful tool to interpret near subsurface geologic structures. In addition, gradient measuring instruments provide multiple components of full gradient tensor. The use of gravity gradients dates back to the invention of Eotvos torsion balance instrument by Lorand von Eotvos in 1896. The use of instrument was primarily on for oil exploration [2]. With the advent of

moving based gravity gradiometer survey system in 1970s, the usage of the gravity gradients in resource exploration has been brought to the fore and found its place in a wide range of application areas. Gravity gradients have been used to detect fault related geothermal resources by [3-4,5]. [6] used a 3D inversion of gravity gradients to explore mineral deposits. [7] explores mineral deposits and geothermal systems from airborne gravity gradiometry data and used tensor invariants to interpret lineaments. [8] have modelled satellite-based gravity gradient data to interpret lithospheric structure. Gravity gradient tensor has been derived from gravity data by [9]. They derived gravity gradient tensor from gravity data using Fourier transform in frequency domain. [10] have derived gravity gradients from satellite altimetry data for bathymetry inversion. [11,12] derived three algorithms based on Stokes integral, Least-Squares collocation and radial basis spline models from both regularly distributed surface gravity anomaly and elevation data in space domain to validate airborne gravity gradiometry survey data.

Their least-squares collocation method is based on a global covariance function. In this study, full tensor gravity gradient components have been calculated from surface gravity anomaly data collected over Southern Oklahoma region. The purpose is to show the modelling method along with covariance matrices and evaluate it using real airborne gravity gradiometry survey data and EGM08 model.

2. Materials and Methods

Most common measurement in geophysics and geodesy is acceleration of gravity which is the first vertical derivatives of gravity potential, W . The gravity potential is approximated by normal gravity field, U which is generated by an ellipsoid of revolution called normal ellipsoid rotating with the earth and including its mass. The normal gravity field and its gradients are known for a specific ellipsoid such as GRS80 or WGS84. The residual part is called disturbing potential, T and defined by subtracting the normal gravity potential from the total gravity potential [13].

$$T = W - U \tag{1}$$

In a local Cartesian coordinate system $(x, y, z) \rightarrow (x_1, x_2, x_3)$, the gravity gradient disturbances being second order partial derivative of the disturbing potential, $\Gamma = [\Gamma_{j,k}]$, $j, k = 1,2,3$ is defined by [14]

$$\Gamma = \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 T}{\partial x_1 \partial x_1} & \frac{\partial^2 T}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 T}{\partial x_1 \partial x_3} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 T}{\partial x_2 \partial x_2} & \frac{\partial^2 T}{\partial x_2 \partial x_3} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x_3 \partial x_1} & \frac{\partial^2 T}{\partial x_3 \partial x_2} & \frac{\partial^2 T}{\partial x_3 \partial x_3} \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.1. Least-squares collocation

Estimating gravity gradients from surface gravity anomalies is depend on solutions to the geodetic boundary value problem. Least-Squares Collocation is one method for the solution to the boundary value problem to solve disturbing potential, T . Using this solution to the disturbing potential, other gravimetric quantities can be expressed as linear functional of the disturbing potential, T . The minimum norm, minimum error variance least-squares collocation solution for the disturbing potential is given by [15]

$$\hat{T} = C_{T,s_2} (C_{s_2,s_2} + D_n)^{-1} \ell \tag{3}$$

where observation vector (gravity anomalies) is given by $\ell = s_2 + n$, n observation noise vector, D_n is observational noise, C_{s_2,s_2} is the covariance matrix of observed quantities, C_{T,s_2} is covariance matrix between the observed quantities and the disturbing potential.

In plane approximation, gravity disturbance is equal to gravity anomaly, which is negative vertical derivative of the disturbing potential [14]

$$\Delta g = \delta g = -\frac{\partial T}{\partial x_3} \tag{4}$$

By applying linear operators $L_1 = \partial^2 / \partial x_j \partial x_k$ and $L_2 = -\partial / \partial x_3$ to the disturbing potential in equation 3, $s_2 = L_2 T$, the least-squares solution to the gradient disturbances are given by

$$\Gamma_{jk} = C_{(\Gamma_{jk}, \Delta g)} (C_{(\Delta g, \Delta g)} + D_n)^{-1} \Delta g \tag{5}$$

Covariances related to the gravity gradient disturbances can be derived by applying law of error propagation of covariance model defined for the disturbing potential [16]. Assuming a stochastic process of the disturbing potential, covariance model for the disturbing potential is based on reciprocal distance model and given by [1]

$$C_{TT}(s; x_3, x_3') = \frac{\sigma^2}{\sqrt{\alpha^2 s^2 + (1 + \alpha(x_3 + x_3'))^2}} \tag{6}$$

where $s = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}$; $\Delta x_1 = x_1 - x_1'$; $\Delta x_2 = x_2 - x_2'$ are coordinate differences; x_3, x_3' are heights of the points; and σ^2, α are covariance model parameters. Since T is a potential, its covariance function enables to be upward-continued by the sum of altitude coordinates, $x_3 + x_3'$. The covariance function is based on assumption of ergodicity and thus stationary which means that the covariance function depends only on horizontal coordinate differences. By applying law of propagation of covariances to the equation (6), covariances between the gravity anomaly and the gravity gradient disturbances are derived by [1]

$$C_{(\Delta g, \Delta g)} = \frac{3\sigma^2\alpha^2}{M^{5/2}} (2\beta^2 - \alpha^2 s^2) \tag{7}$$

$$C_{(\Gamma_{11}, \Delta g)} = -\frac{3\sigma^2\alpha^3\beta}{M^{7/2}} (-\beta^2 - \alpha^2 s^2 + 5\alpha 2\Delta x_1^2) \tag{8}$$

$$C_{(\Gamma_{22}, \Delta g)} = -\frac{3\sigma^2\alpha^3\beta}{M^{7/2}} (-\beta^2 - \alpha^2 s^2 + 5\alpha 2\Delta x_2^2) \tag{9}$$

$$C_{(\Gamma_{33}, \Delta g)} = \frac{3\sigma^2\alpha^3\beta}{M^{7/2}} (-2\beta^2 + 3\alpha^2 s^2) \tag{10}$$

$$C_{(\Gamma_{13}, \Delta g)} = \frac{3\sigma^2\alpha^4\Delta x_1}{M^{7/2}} (-4\beta^2 + \alpha^2 s^2) \tag{11}$$

$$C_{(\Gamma_{12}, \Delta g)} = -\frac{15\sigma^2\alpha^5\beta}{M^{7/2}} \Delta x_1 \Delta x_2 \tag{12}$$

$$C_{(\Gamma_{23}, \Delta g)} = \frac{3\sigma^2\alpha^4\Delta x_2}{M^{7/2}} (-4\beta^2 + \alpha^2 s^2) \tag{13}$$

where $\beta = 1 + \alpha(x_3 + x_3')$ and $M = \beta^2 + \alpha^2 s^2$.

Using the covariance function for the disturbing potential, [14] estimates geoid undulation from the gravity anomaly data given along track in frequency domain.

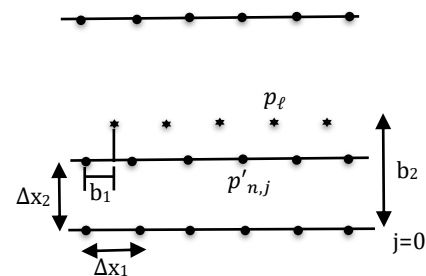


Figure 1. Geometry of the data points adapted from [14]

Here the problem is adapted to estimate the gravity gradient disturbances in space domain. Suppose that there are regularly distributed points along tracks being parallel each other and

having coordinates, $p'_{n,j} = (n\Delta x_1, j\Delta x_2)$, where Δx_1 is the distance between points along tracks, n is number of points along tracks, $n = 0, \dots, N - 1$, Δx_2 is the distance between tracks and the number of tracks is denoted by $j = 0, \dots, J - 1$. The gradient disturbances are estimated at the points located at $p_\ell = (\ell\Delta x_1 + b_1, b_2)$. The computation points have same along distance with observation points, but they have displacement from the $j=0$ track and from measurements along tracks. The displacement vector is defined by $\mathbf{b} = (b_1 \ b_2)^T$. Observations are collected in $J \times 1$ vector including n^{th} measurement along all tracks,

$$\Delta g_n = [\Delta g(p'_{n,0}) \ \dots \ \Delta g(p'_{n,J-1})]^T \quad (14)$$

The cross-covariance matrix is defined by

$$C_{\Delta g, \Gamma_{j,k}}(p, p') = \begin{bmatrix} C_{\Delta g, \Gamma_{j,k}}(p_\ell, p'_n) & C_{\Delta g, \Gamma_{j,k}}(p_\ell, p'_{n+1}) & \dots \\ C_{\Delta g, \Gamma_{j,k}}(p_{\ell+1}, p'_n) & C_{\Delta g, \Gamma_{j,k}}(p_{\ell+1}, p'_n) & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (15)$$

where $C_{\Delta g, \Gamma_{j,k}}(p_\ell, p'_n)$ includes $1 \times J$ row vectors that represent elements of covariances between estimation point located at p_ℓ and the elements of Δg_n located at p'_n . Auto-covariance matrix is defined by

$$C_{\Delta g, \Delta g}(p', p') = \begin{bmatrix} C_{\Delta g, \Delta g}(p'_m, p'_n) & C_{\Delta g, \Delta g}(p'_m, p'_{n+1}) & \dots \\ C_{\Delta g, \Delta g}(p'_{m+1}, p'_n) & C_{\Delta g, \Delta g}(p'_{m+1}, p'_n) & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (16)$$

where $C_{\Delta g, \Delta g}(p'_m, p'_n)$ includes $J \times J$ matrices that represent covariances among elements of Δg_n and Δg_m located at track points, p'_n and p'_m .

3. Results and Discussion

The study area lies in the Wichita uplift region of the Southern Oklahoma Aulacogen that is characterized by a failed rift arm located in Oklahoma and Texas region in US [17]. The region is bounded by major fault zones to the south, Waurika Munster - North Fork-Altus-Burch faults that separate the uplift from Hollis basin and to the north, Mountain view fault and Meers fault are the major fault segments that separate the uplift from Anadarko basin (figure 2) [18].

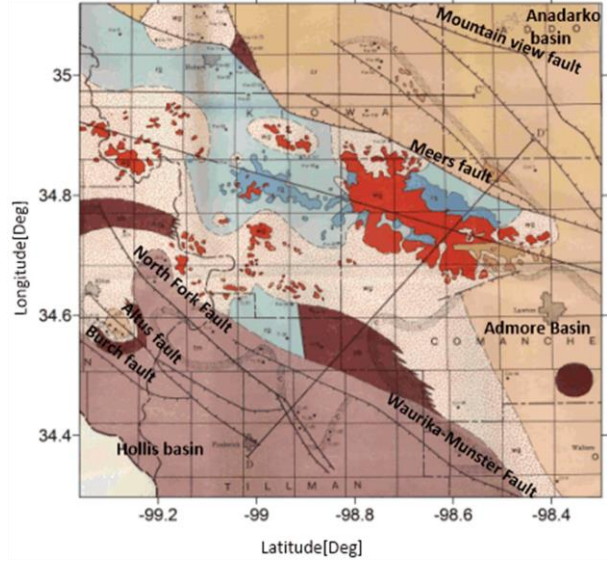
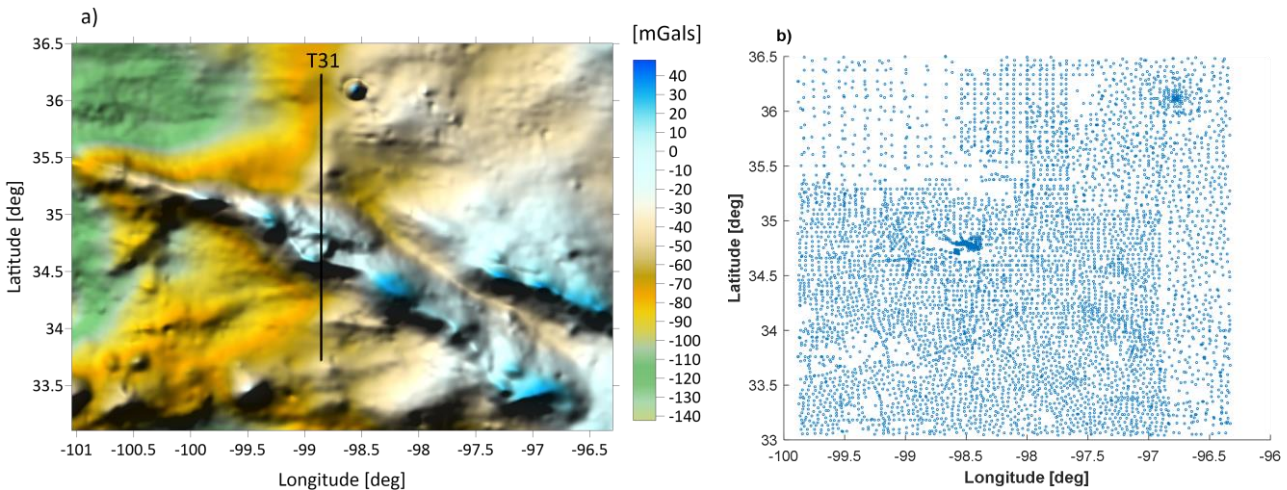


Figure 2. Geologic map of the Wichita uplift region extracted from map (plate I) by [18]

Many seismic studies have been performed in the area due to bearing one of major oil fields in the US. The region is also special in terms of having strong gravity signatures with moderate terrain effects. Therefore, the first gravity gradiometer survey system (GGSS) was flown over Texas/Oklahoma region in 1987 which allows the aircraft to fly low on the ground [19].



The elevation of the topography in the region (Figure 3.d) ranges from 148 m to 786 m. The mean elevation of the area is 395m. Figure 3.a demonstrates complete Bouguer gravity anomaly data of the region that are downloaded from USGS website and the real airborne gradiometric survey profile superimposed on it. The data set that generates the complete Bouguer anomaly grid was compiled from the gravity databases obtained from the National

Geophysical Data Center and from the USGS and from several university theses. The data were interpolated to a $2\text{km} \times 2\text{km}$ regular grid data. Figure 3.c demonstrates the Complete Bouguer gravity anomaly data along track T31. The region has gravity highs (50-80 mGal) trending south-east to north-west with an elongated structure. [20] indicates that these gravity highs are assumed to be caused by density variations in the upper crust.

The region also has the second largest gravity anomaly after the mid- continent rift in the US. Modeled gravity gradient

disturbances are computed along profile T31 from free air gravity anomalies (Figure 3.e).

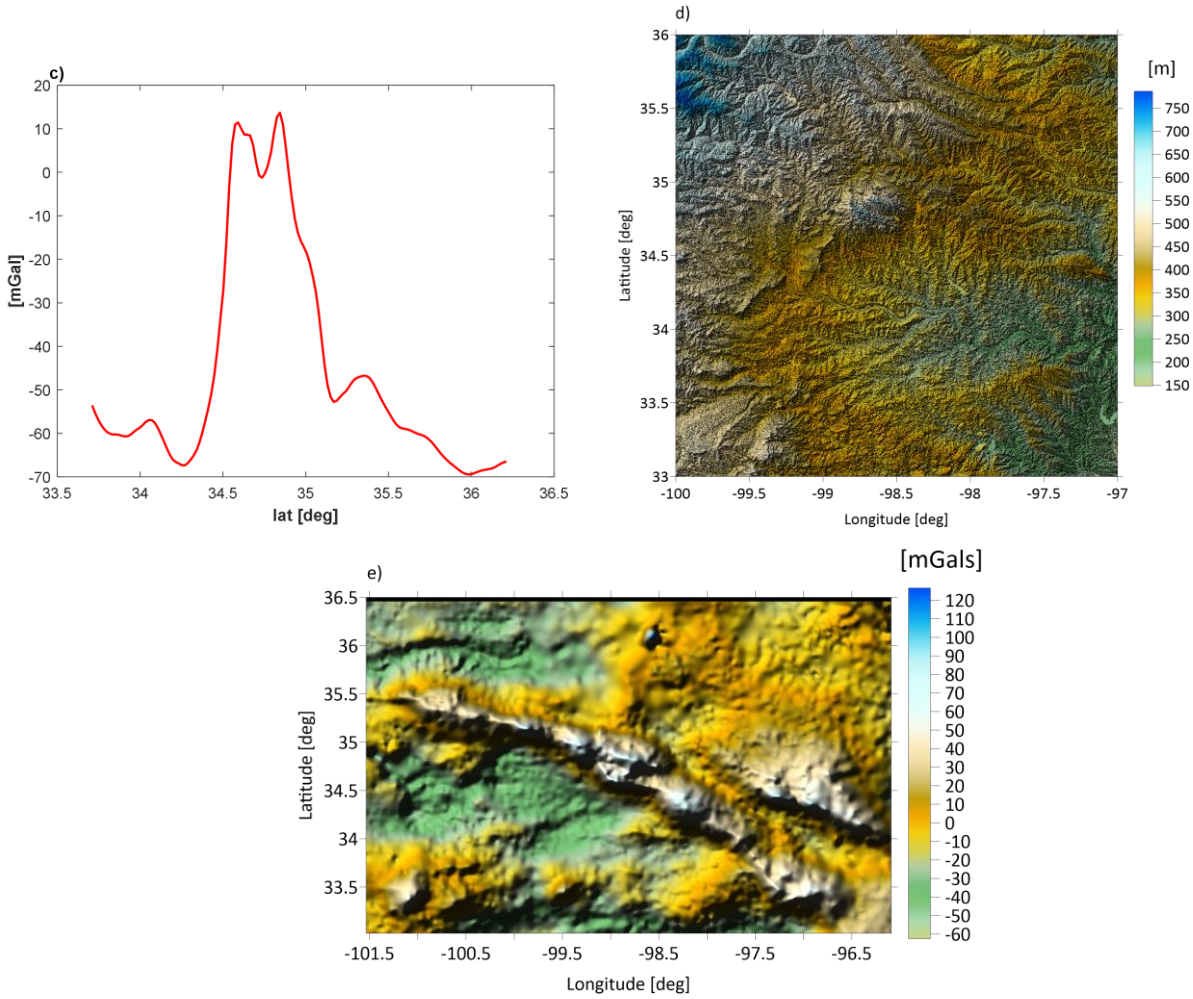


Figure 3.a) Complete Bouguer gravity anomaly map of Southern Oklahoma downloaded from USGS website (<https://pubs.usgs.gov/ds/2006/232/data/>) b) Gravity anomaly data distribution of the Wichita uplift region c) Complete Bouguer gravity anomaly along track T31 d) Topographic map of the area generated from shuttle radar topography mission (SRTM) e) Free air gravity anomaly data of the region.

Table 1. Reciprocal distance PSD parameters.

j	$\sigma^2[\text{m}^4/\text{s}^4]$	$\alpha[1/\text{m}]$
1	2×10^{-5}	10^{-3}
2	10^{-4}	6×10^{-4}
3	7.5×10^{-4}	3×10^{-4}
4	1.42×10^{-2}	1.51×10^{-4}
5	7.5×10^{-1}	4.5×10^{-5}
6	3.6×10^1	1.45×10^{-5}
7	7.78×10^2	4.9×10^{-6}
8	3.5×10^3	7.7×10^{-7}
9	1.1×10^5	4.16×10^{-7}

Covariance model parameters, J , σ_j^2 , α_j are determined from by fitting empirical determination of power spectral density (PSD) of the gravitational field data [15]. One set of model parameters derived in Texas/Oklahoma region is given in Table 1.

As shown in Figure 3.a), a single track(T31) gravity anomaly data is given between latitudes $33.71^\circ \leq \phi \leq 36.21^\circ$ and longitude at $\lambda = -98.8635^\circ$. Modeled gradients are computed on the points along this track. The length of the observation track(T31) is about 278 km including $N = 140$ points. Along track distance between points is about 2 km. To compute gradient disturbances on the ground level, the altitude of points is set to zero, $x_3 = x'_3 = 0$. It is assumed that the observations are uncorrelated and have equal variance. The accuracy of the gravity anomaly data is taken as 2mGal. Therefore, covariance matrix of the observation noise becomes a diagonal matrix of size 140×140 , with variances of 4mGal^2 .

$$D_n = \begin{bmatrix} 4\text{mGal}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 4\text{mGal}^2 \end{bmatrix}_{140 \times 140}$$

Since the estimation points are on the observation profile, the displacement vector $\mathbf{b} = 0$. In case of a single track, $J=1$ and $\Delta x_2 = 0$. The auto- and cross- covariance matrices given in equations (15) and (16) take the form of,

$$C_{\Delta g, \Delta g}(p, p') = \begin{bmatrix} C(p_1, p'_1) & \cdots & C(p_1, p'_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C(p_\ell, p'_1) & \cdots & C(p_\ell, p'_n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C_{\Gamma_{jk}, \Delta g}(p, p') = \begin{bmatrix} C(p_1, p'_1) & \cdots & C(p_1, p'_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C(p_\ell, p'_1) & \cdots & C(p_\ell, p'_n) \end{bmatrix} \quad (18)$$

According to equations (7)-(13), cross-covariances $C_{(\Gamma_{11}, \Delta g)}$, $C_{(\Gamma_{22}, \Delta g)}$, $C_{(\Gamma_{12}, \Delta g)}$ and $C_{(\Gamma_{23}, \Delta g)}$ become zero. Remaining covariances along track T31 are demonstrated in Figure 4.

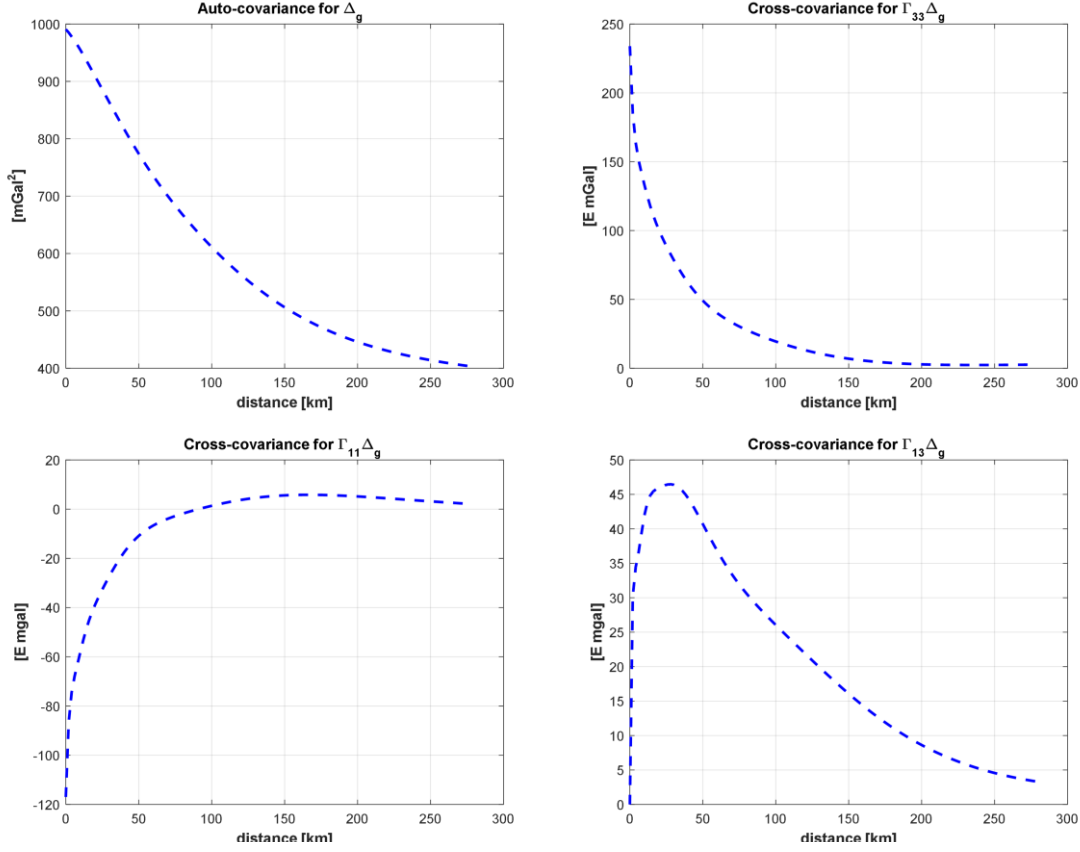
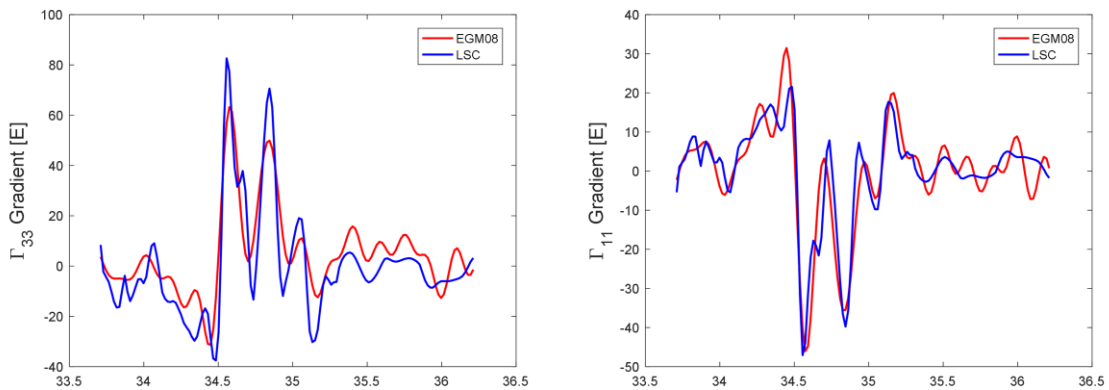


Figure 4. Auto-covariance for the gravity anomaly, Δg , and cross-covariances between the gravity gradient disturbances, Γ_{33} , Γ_{11} and Γ_{13} , and the gravity anomaly, Δg .

Using these covariances, the modeled gravity gradient disturbances are computed using least-squares collocation by

$$\Gamma_{jk} = C_{(\Gamma_{33}, \Delta g)} \left(C_{(\Delta g, \Delta g)} + D_n \right)^{-1} \Delta g \quad (19)$$

and compared with the observation profile generated from EGM08 model. The resolution of the EGM08 model ($n_{max} = 2160$) is about 9 km at the equator [21]. East-west resolution of EGM08 model for this region is about 7.6 km. The results are illustrated in Figure 5.



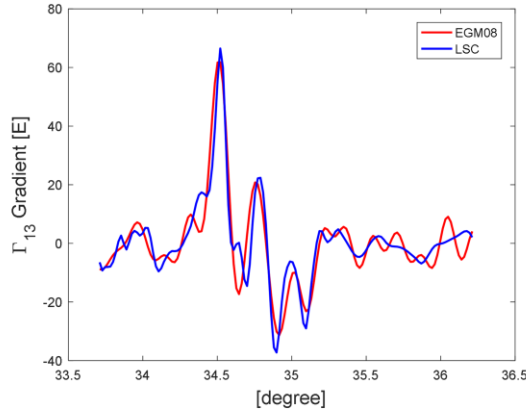


Figure 5. Plots of modeled gravity gradient disturbances computed on the earth's surface using least-squares collocation (LSC) and corresponding EGM08 profile along track T31.

To estimate the gravity gradient disturbances from multiple observation tracks, additional two tracks are considered given either side of the track (T31) between latitudes $33.71^\circ \leq \phi \leq 36.21^\circ$ and longitudes at $\lambda = -98.9294^\circ$ and $\lambda = -98.7976^\circ$. Along track distance is same for all tracks, $\Delta x_1 = 2\text{km}$ and the distance between tracks is $\Delta x_2 = 6\text{km}$. For three tracks, $J = 3$. Each element of cross-covariance matrix, which is 140×420 in size, contains 1×3 row vectors. Cross-covariances are defined by

$$C_{\Gamma_{jk}, \Delta g}(p, p') = \begin{bmatrix} C(p_1, p'_1) & C(p_1, p'_2) & C(p_1, p'_3) & \ddots \\ C(p_2, p'_1) & C(p_2, p'_2) & C(p_2, p'_3) & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ C(p_\ell, p'_n) & C(p_\ell, p'_n) & C(p_\ell, p'_n) & \ddots \end{bmatrix} \quad (20)$$

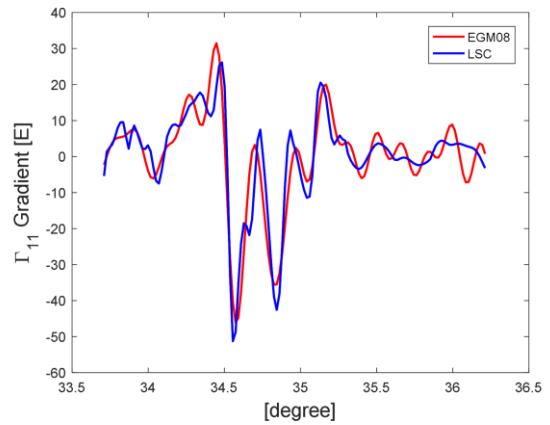
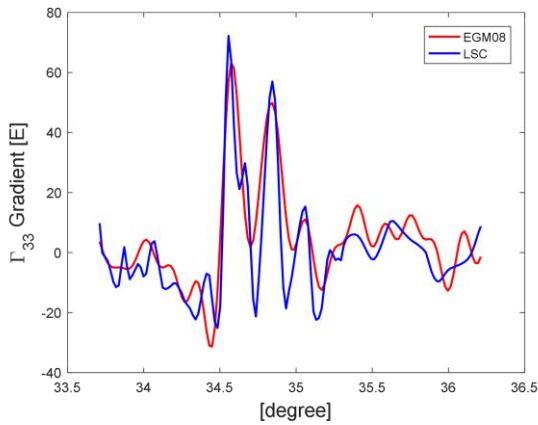
The elements of the covariance matrix represent the covariances between the gravity gradient disturbances on the middle track and gravity anomalies given on the three tracks. Elements of the auto-covariance matrix are the covariances between gravity anomalies on any two tracks separated by 0km , $\Delta x_2\text{km}$ and $2\Delta x_2\text{km}$ and given by

$$C_{\Delta g, \Delta g}(p', p') = \begin{bmatrix} C(p'_1, p'_1) & C(p'_1, p'_2) & C(p'_1, p'_3) & \ddots \\ C(p'_2, p'_1) & C(p'_2, p'_2) & C(p'_2, p'_3) & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ C(p'_n, p'_1) & C(p'_n, p'_2) & C(p'_n, p'_n) & \ddots \end{bmatrix} \quad (21)$$

And corresponding observation vector includes gravity anomalies on the three tracks and is defined by

$$\Delta g = [\Delta g(p'_{n,0}) \quad \Delta g(p'_{n,1}) \quad \Delta g(p'_{n,2}) \quad \dots]^T \quad (22)$$

Figure 6 illustrates a comparison of modeled gravity gradient disturbances estimated using LSC with corresponding EGM08 data profile. Modeled gravity gradient disturbances agree well with the EGM08 generated gravity gradient disturbances. There is some discrepancy between gradients that include components in the east-west direction and corresponding EGM08 data profile, especially for Γ_{22} gradient. The discrepancy could be due to a lack of data in x_2 -direction. Improving the estimation of the modeled gradient, Γ_{22} could be achieved by adding more data tracks to the estimation process.



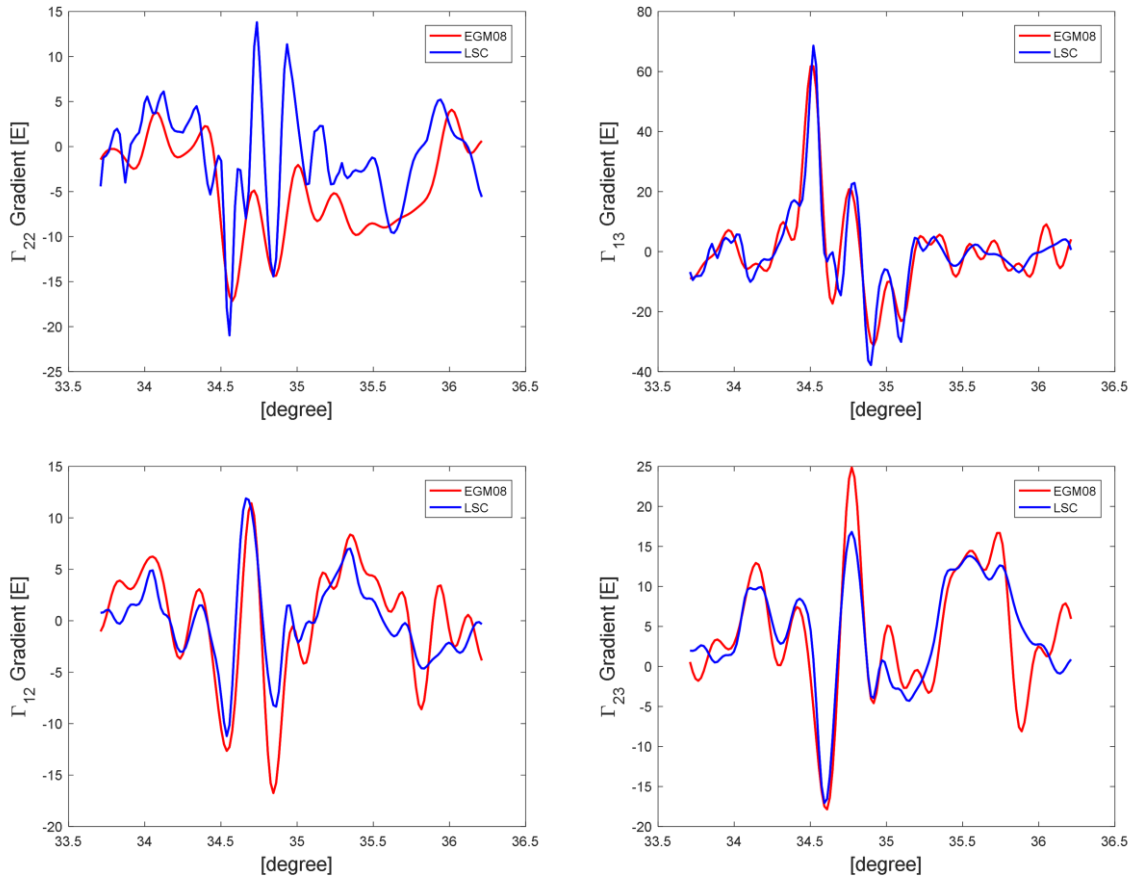


Figure 6. Computed gravity gradient disturbances on the earth’s surface (zero altitude) using LSC and corresponding EGM08 gradients along track T31.

Figure 7 illustrate differences between modeled gravity gradient disturbances and EGM08 generated gradients along profile T31. The corresponding statistics of the differences are listed in table 2. Standard deviation of the differences ranges from 3 E to 10 E. Standard deviation of Γ_{22} is smaller than that of the other diagonal gradients as magnitude of Γ_{22} gradient is smaller compared to the other diagonal gradients. Overall, standard deviation of differences in gradients that include components in the east-west direction is also smaller than that of the other

gradients. Finally, modeled gravity gradient disturbances are computed at an aircraft altitude along track T31 and compared with the real airborne gravity gradiometry data as well. The profile T31 is an actual gravity gradiometry survey data and is approximately 278 km long. The altitude of the profile above terrain is approximately 1000m. The profile includes 2533 points with a sampling interval of 110 m. [17] stated that terrain effect on profile T31 is negligible; so, terrain correction hasn’t been applied to the profile. Some of the gradients along this track are illustrated in Figure 8.

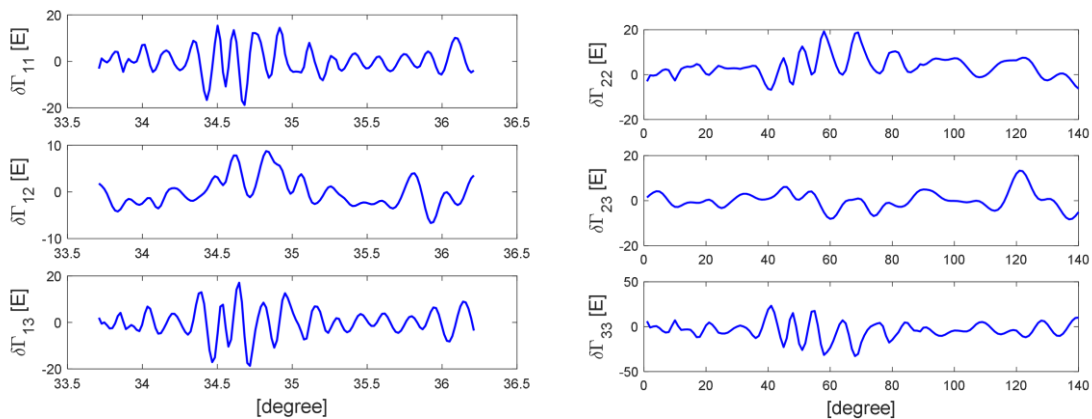


Figure 7. Differences between modeled gravity gradient disturbances and EGM08 gradients along track T31.

Table 2. Differences between modeled gradient disturbances and EGM08 gradients along profile T31 and corresponding statistics

Gradients [E]	$\delta\Gamma_{11}$	$\delta\Gamma_{12}$	$\delta\Gamma_{13}$	$\delta\Gamma_{22}$	$\delta\Gamma_{23}$	$\delta\Gamma_{33}$
Mean	0.320	-0.05	0.105	3.640	0.179	-3.961
Std	5.936	3.143	6.034	4.870	3.996	9.528
max	15.360	8.738	17.095	19.284	13.331	23.377
min	-18.753	-6.663	-18.684	-6.745	-8.291	-32.771

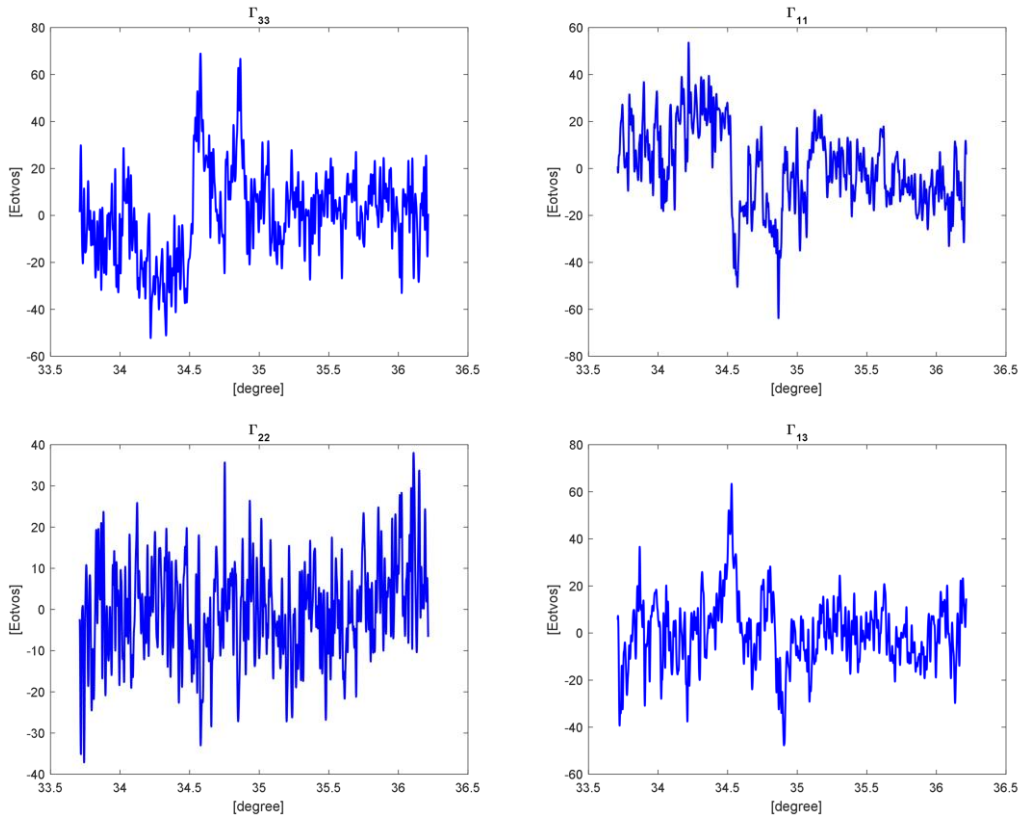


Figure 8. Gravity Gradiometer Survey Data along T31 profile

GGSS data are smoothed with a window size of 10 km to reduce very high frequency variations. Modeled gradient disturbances are calculated at the aircraft altitude of $x_3 = x'_3 = 1000m$. Since GGSS data has higher resolution, estimation points are spaced 0.11km apart. Therefore, the displacement vector components are $b_1 = 0.11km$ and $b_2 = 0$. The results are illustrated in Figure 10. Modeled gradients generally agree with EGM08 model generated gradients. However, there are some discrepancies observed between airborne gradiometric data and some modeled gradients. The modeled gradients, Γ_{22} and Γ_{12} have more agreement with EGM08 data than the airborne data. Since being first test of the Gravity Gradiometer Survey System (GGSS) performed in 1987, the data does not meet highest quality standards. Figure 9 compares spectra of both GGSS data and corresponding EGM08 profile for the gradient Γ_{12} along track T31. Power spectral density of GGSS data does not agree much with PSD of EGM08 data. Figure 11 demonstrates differences between modeled gravity gradient disturbances and EGM08 generated gradients together with airborne gradiometer data along track T31.

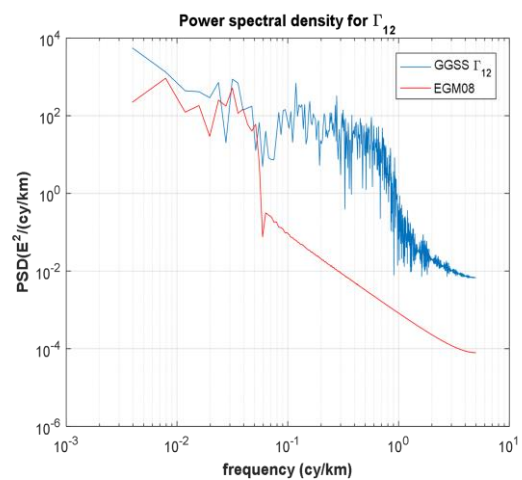


Figure 9. Power spectral densities of Γ_{12} according to EGM08 model and GGSS data along track T31.



Figure 10. Plots of modeled gravity gradient disturbances, EGM08 gradients and airborne gradiometry data along track T31

Tables 3 and 4 show differences between modeled gradient disturbances and EGM08 gradients, as well as airborne gradiometry data along track 31. Standard deviation of differences based on airborne gradiometry data is greater than

those calculated from EGM08 data. In most cases, standard deviation of differences between modeled gradients with components in the east-west direction and both EGM08 gradients and airborne gradiometer data is smaller than that of the other gradients.

Table 3. Differences between modeled gradient disturbances and EGM08 gradients along profile T31 and corresponding statistics

Gradients [E]	$\delta\Gamma_{11}$	$\delta\Gamma_{12}$	$\delta\Gamma_{13}$	$\delta\Gamma_{22}$	$\delta\Gamma_{23}$	$\delta\Gamma_{33}$
Mean	0.437	-0.041	0.120	3.250	0.291	-3.671
Std	5.766	2.928	4.907	3.329	3.055	6.283
max	16.484	10.546	11.288	12.775	9.417	11.496
min	-21.400	-5.484	-14.296	-4.150	-7.031	-26.037

Table 4. Differences between modeled gradient disturbances and airborne gradiometry data along profile T31 and corresponding statistics

Gradients [E]	$\delta\Gamma_{11}$	$\delta\Gamma_{12}$	$\delta\Gamma_{13}$	$\delta\Gamma_{22}$	$\delta\Gamma_{23}$	$\delta\Gamma_{33}$
Mean	0.188	0.016	0.373	-0.893	4.159	0.729
Std	9.107	8.983	7.249	6.411	8.898	8.250
max	21.160	16.890	24.556	13.615	21.087	21.084
min	-22.328	-19.564	-16.323	-18.326	-25.443	-17.942

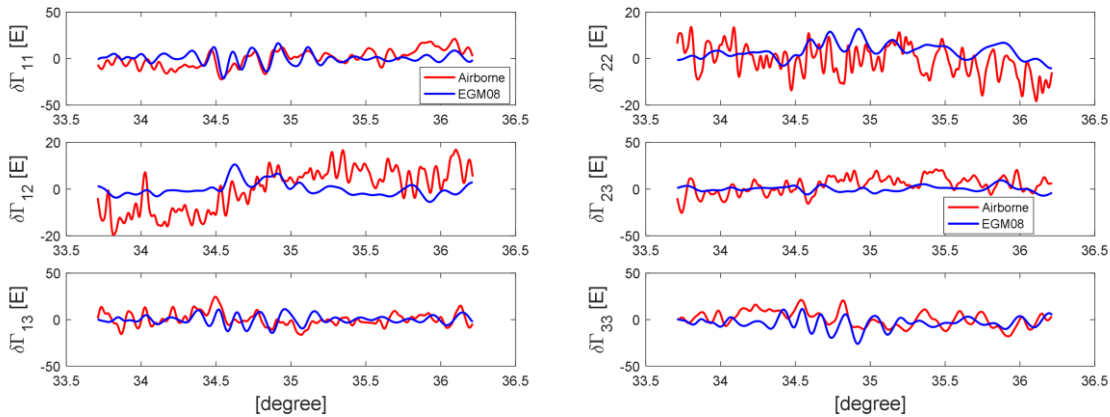


Figure 11. Differences between modeled gravity gradient disturbances and both EGM08 gradients and airborne gradiometry data along profile T31.

4. Conclusions

This study presents modeling of the gravity gradient disturbances from free air gravity anomaly data employing least-squares collocation and evaluates the modeling method using both real airborne gradiometer data and EGM08 gradients. Such modeling is useful for validating airborne gradiometer survey data. It has been shown that modeled gradients have good agreement with EGM08 generated gravity gradient disturbances both on the ground and at an aircraft altitude. There are some discrepancies in modeled gradients including components in the east-west direction, which may be due to a lack of data in that direction. Since the airborne gradiometry data used in this study is the first test survey of airborne gradiometer survey system, the quality of the data may not be good enough to evaluate all modeled gradients. It is important to emphasize that the airborne gradiometer data has higher resolution than both EGM08 model and ground gravity anomaly data. Standard deviation of differences between modeled gradients and both EGM08 gradients and airborne gradiometer data are between 2-10E for all gradients. The differences in gradients containing components in the east-west direction are smaller than those in the other gradients, likely because these gradients have smaller magnitude than the others. This can be attributed to elongated structure of the fault system lying in this region, resulting in less variations in gradients along the east-west direction.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

This article does not require ethics committee approval.

This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

Acknowledgment

The author thanks two anonymous reviewers for their valuable comments on this manuscript.

Author Contribution Statement

S. Uzun conceptualized the manuscript, wrote original draft, carried out numerical experiments, revised the manuscript and approved final version of the manuscript.

References

- [1] Jekeli, C. 2003. Statistical Analysis of Moving-Base Gravimetry and Gravity Gradiometry, Report No.466, Ohio State University.
- [2] Jekeli, C. 2006. Airborne Gradiometry Error Analysis: Surveys in Geophysics, V.27, pp. 257-275. DOI:10.1007/s10712-005-3826-4
- [3] Kohn, B. S., Bonet, C., DiFrancesco, D. and Gibson, H. 2011. Geothermal Exploration Using Gravity Gradiometry - a Salton Sea Example: GRC transactions. V.35, pp.1699-1702.
- [4] Represas P., Monteiro Santos F.A., Ribeiro, J., Ribeiro J.A., Almeida E.P., Gonçalves R., Moreira M. and Mendes-Victor L.A., 2013. Interpretation of gravity data to delineate structural features connected to low-temperature geothermal resources at Northeastern Portugal: Journal of applied geophysics, V.92, pp. 30-38. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.011
- [5] Shoffner J.D., Li Y., Sabin A. and Lazaro M., 2011. Understanding the utility of gravity and gravity gradiometry for geothermal exploration in the Southern Walker Lake Basin, Nevada: GRC Transactions, V.35, pp.1747-1751.
- [6] Martinez, C., Li, Y., Krahenbuhl, R. and Braga, M. A. 2013. 3D inversion of airborne gravity gradiometry data in mineral exploration: A case study in the Quadrilatero Ferrifero, Brazil, V.78, no.1, pp. B1-B11. DOI: 10.1190/GEO2012-0106.1
- [7] Mataragio, J. 2012. Exploring for Gold and Geothermal Systems in the Great Basin Using Full Tensor Gravity Gradiometry: GRC Transactions, V. 36, pp. 1009-1012.
- [8] Pappa, F., Ebbing, J., Ferraccioli, F. and van der Wal, W. 2019. Modelling Satellite Gravity Gradient Data to Derive Density, Temperature and Viscosity Structure of the Antarctic Lithosphere: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, V.124, pp. 12053-12076. DOI: 10.1029/2019JB017997
- [9] Mickus, K.L. and Hinojosa, J.H. 2001. The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity: a Fourier transform technique: Journal of applied Geophysics, V.46, pp.159-174. DOI:10.1016/S0926-9851(01)00031-3

- [10] Wan, X., Annan, R.F. and Ziggah, Y.Y. 2023. Altimetry-Derived Gravity Gradients Using Spectral Method and Their Performance in Bathymetry Inversion Using Back-Propagation Neural Network: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, V.128. DOI:10.1029/2022JB025785
- [11] Jekeli, C. and Zhu, L. 2006. Comparison of methods to model the gravitational gradients from topographic data bases: *Geophysical Journal International*, V.166, pp.999-1014. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03063.x
- [12] Jekeli, C. and Zhu, L. 2009. Gravity gradient modeling using gravity and DEM: *Journal of Geodesy*, V.83, pp. 557-567. DOI: 10.1007/s00190-008-0273-2
- [13] Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H. 2005. *Physical Geodesy*. Springer Verlag, Berlin, 403 p.
- [14] Jekeli, C. 2017. *Spectral Methods in Geodesy and Geophysics*: Taylor and Francis, 415 p.
- [15] Jekeli, C. 2010. *Least-squares Collocation*, Lecture notes, School of Earth Sciences, Ohio State University.
- [16] Moritz, H. 1980. *Advanced Physical Geodesy*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe (reprint 2008 by Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences, Ohio State University), 500 p.
- [17] Erkan, K. 2015. *Geophysical Investigations on Gravity Gradiometry and Magnetic Data over the Wichita Uplift Region, Southwestern Oklahoma*, Report No. 509, Ohio State University
- [18] Ham, W.E., Denison, R.E. and Meritt, C.A. 1964. Basement rocks and structural evolution of Southern Oklahoma: *Oklahoma Geological Survey Bulletin*, 95, 302 p. plate I.
- [19] Jekeli, C. 1993. A review of gravity gradiometer survey system data analyses: *Geophysics*, V.58, No:4, pp.508-514. DOI:10.1190/1.1443433
- [20] Robbins, S.L. and Keller, G.R. 1992. Complete Bouguer and Isostatic residual maps of the Anadarko Basin, Wichita Mountains and surrounding areas, Oklahoma, Kansas, Texas and Colorado, *US Geological Survey Bulletin*, No:1866G, 11 p.
- [21] Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.F. 2012. The development and evaluation of Earth Gravitational Model (EGM2008): *Journal of Geophysical Research*, V.117, B04406. DOI: 10.1029/2011JB008916



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALASI

Electrodeposited ZnO Nanostructures on ITO Surfaces: Exploring Their Efficacy for Cholesterol Biosensing Applications

ITO Yüzeylerinde Elektrodepozitlenen ZnO Nanoyapılar: Kolesterol Biyosensör Uygulamaları için Etkinliklerinin Araştırılması

Mustafa Erol ^{1*}, Ahmet Aykaç ², Tuncay Dikici ³, Metin Yurddaşkal ^{1,4}, Uğur Kartal ⁵,
Begüm Uzunbayır ¹, Erdem Tevfik Özdemir ¹

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

² İzmir Katip Çelebi University, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksek Okulu, Metal ve Metal Teknolojileri Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektronik Malzemeler Üretimi ve Uygulama Merkezi, İzmir, TÜRKİYE

⁵ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: m.erol@deu.edu.tr

Abstract

In this study, ZnO nanostructures were prepared by electrochemical anodization of electrodeposited Zn on ITO/glass substrates for cholesterol detection. The efficiency of the developed ZnO nanostructures in the detection of the Cholesterol oxidase (ChOx) enzyme was determined by the cyclic voltammetry method. The XRD and SEM results confirmed the synthesis of ZnO nanostructures prepared by the anodization method with various parameters. The effect of electrodeposition and anodization time on the morphology was observed. Cyclic voltammetry of ZnO/Zn/ITO/glass and Pt/ZnO/Zn/ITO/glass electrodes in electrolytes with various cholesterol concentrations was performed. The detection limit of the obtained Pt/ZnO/Zn/ITO/glass structured electrode was calculated as $0.965 \times 10^{-3} M$. The resulting material with a layered structure may have potential applications in electrochemical sensors and biosensors in biomedical applications. In addition to biosensing performance, this study proposes a new approach for the development of ZnO-based biosensors that does not require expensive infrastructure and raw material costs, making it possible to develop high-sensitivity biosensor electrodes with lower detection limits with improvements to be made in future studies.

Keywords: ZnO nanostructures, electrochemical anodization, cholesterol, biosensor

Öz

Bu çalışmada, ZnO nanoyapıları, kolesterol tespiti için ITO/cam altlıklar üzerine elektrodepozitlenen Zn'nin elektrokimyasal anodizasyonu ile hazırlanmıştır. Geliştirilen ZnO nanoyapıların Kolesterol oksidaz (ChOx) enziminin tespitindeki etkinliği döngüsel voltametri yöntemi ile belirlenmiştir. XRD ve SEM sonuçları, çeşitli parametrelerle anodizasyon yöntemiyle hazırlanan ZnO nanoyapıların sentezini doğrulamıştır. Elektrodepozisyon ve anodizasyon süresinin morfoloji üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. ZnO/Zn/ITO/cam ve Pt/ZnO/Zn/ITO/cam elektrotların çeşitli kolesterol konsantrasyonlarına sahip elektrolitlerdeki döngüsel voltametri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen Pt/ZnO/Zn/ITO/cam yapılı elektrotun tespit limiti $0,965 \times 10^{-3} M$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen katmanlı yapıya sahip malzeme, biyomedikal uygulamalarda elektrokimyasal sensörlerde ve biyosensörlerde potansiyel uygulamalara sahip olabilir. Bu çalışma, biyosensör performansına ek olarak, ZnO tabanlı biyosensörlerin geliştirilmesi için pahalı altyapı ve hammadde maliyeti gerektirmeyen yeni bir yaklaşım önermekte ve gelecek çalışmalarda yapılacak iyileştirmelerle daha düşük tespit limitlerine sahip yüksek hassasiyetli biyosensör elektrotlarının geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ZnO nanoyapılar, elektrokimyasal anotlama, kolesterol, biyosensör

1. Introduction

The utilization of biosensors in clinical diagnostics has recently garnered significant attention. Among the various clinical parameters, the measurement of cholesterol especially at higher levels holds particular importance due to its association with conditions such as cardiovascular diseases, obstructive, diabetes, nephrosis, jaundice, etc [1, 2]. The biosensor method, which often involves immobilizing an enzyme to an electrode, has become a critical way to estimate cholesterol. The selection of the immobilization technique significantly influences the

performance of the biosensor [3]. Various techniques have been developed for the detection of cholesterol in blood plasma, including fluorometry, high-performance liquid chromatography, and electrochemical approaches.[4]. Among these methods, electrochemical biosensors are particularly noteworthy due to their high accuracy, low response time, and convenience. The use of modified electrodes in electrochemical assays for cholesterol analysis has significant attention from an increasing number of researchers [5, 6].

For decades, researchers have been interested in material selection, design, structure, processing, morphology control, and optimization of electrochemical biosensors electrodes [7]. Metal oxide nanostructures have been widely used in the development of biosensor electrodes in recent years due to their thermodynamic stability, semiconductor properties, and cost-effectiveness [8–10]. Moreover, they can be produced by many methods to obtain the aforementioned properties expected from them [8]. ZnO has attracted a great deal of attention within the wide range of metal oxide materials. Notably, certain characteristics of ZnO, such as its high thermal and mechanical stability at room temperature and a binding energy of 60 meV, make it a versatile material for various applications [11]. Additionally, ZnO nanostructures exhibit remarkable attributes, including a wide band gap, non-toxicity, biocompatibility, chemical and photochemical stability, and excellent electron mobility features. These qualities render ZnO nanostructures suitable for the production of efficient biosensors [12, 13]. According to the review study of Beitollahi et al on ZnO nanostructures-based biosensors, the most approved production methods of ZnO nanostructures are reported as sol-gel method, double-jet precipitation, thermal evaporation, self-combustion, hydrothermal synthesis, solution synthesis, simple thermal sublimation, polymerized complex method, high energy ball milling, physical vapor deposition, chemical vapor deposition, etc [13–17].

On the other hand, in a recently published review, many different studies evaluated the cholesterol biosensor applications of electrodes containing ZnO nanostructures (nanoparticles, thin films, nanowires, nanobelts, nanotubes and nanorods) in terms of electrode architecture and performance [18]. Considering the studies in which cholesterol oxidase (ChOx) immobilization of ZnO based electrodes were carried out, ITO layers have frequently been used in electrode design as well [3, 19–21]. ITO is known as an excellent material widely utilized in biosensor research due to its distinct features, such as high electrical conductivity, robust substrate adhesion, low capacitive current, and consistent electrochemical and physical properties. Furthermore, ITO electrodes are more cost-effective compared to traditional electrodes like gold, silver, and platinum, making them the preferred option [22].

In the study of Umar et al, ChOx was immobilized onto sol-gel derived ZnO nanoparticles. Subsequently, the immobilized nanoparticles were coated on a gold (Au) electrode to create ChOx/ZnO/Au electrode architecture which exhibits a very high and repeatable sensitivity of $23.7 \mu\text{A mM}^{-1} \text{cm}^{-2}$, detection limit (based on S/N ratio) $0.37 \pm 0.02 \text{ nM}$, response time less than 5 s, linear range from 1.0 to 500.0 nM and correlation coefficient of $R^2 = 0.9975$ [23]. In another study, Wu et al developed ChOx/ZnO/Ag/GO-CS/ITO electrode in which hydrothermally grown ZnO nanostructures, ChOx, silver (Ag) nanowires, and an indium tin oxide (ITO) electrode with graphene oxide (GO) and chitosan (CS) modification are used. The linear response to cholesterol in the range of the fabricated biosensor was reported as $0.25\text{--}400 \text{ mg dL}^{-1}$ ($6.5 \mu\text{M}$ to 10 mM) with a sensitivity of $9.2 \mu\text{A} \mu\text{M}^{-1} \text{cm}^{-2}$ [19].

In the light of the summarized information, there are many studies on electrochemical cholesterol biosensors with different electrode configurations. In this study, two different electrodes, ZnO-coated ITO/glass electrode (ZnO/Zn/ITO/glass) and platinum (Pt) deposited on ZnO-coated ITO/glass electrode (Pt/ZnO/Zn/ITO/glass), were used for cholesterol detection at different concentrations. ZnO, the most important layer in the biosensor structure, was grown by the electrochemical method,

which is a simple method that does not require expensive setup and infrastructure. For the first time in the literature, to the best of our knowledge, the usability of the ZnO structures converted by anodic oxidation of electrodeposited Zn thin films grown on ITO substrates to cholesterol detection was investigated by structural, morphological, and amperometric measurements.

2. Materials and Methods

ITO coated glass (ITO/glass) substrates ($R < 10 \Omega/\text{sq}$) were used as an electrode (Teknoma Inc., Türkiye). In the electrodeposition step, a commercial zinc chloride (ZnCl_2) aqueous solution (0.3 M) was used as an electrolyte. The bulk Zn (99.9%) was used as an anode for metallic Zn deposition. Both the electrodeposition electrolyte and the bulk anode were purchased from the metal deposition company (Temeka Metal Coatings Inc., Türkiye). Potassium bicarbonate (KHCO_3 , Merck, 99.7%) aqueous solution (5 mM) was used as electrolyte in the electrochemical anodization step. For the cleaning procedure acetone ($(\text{CH}_3)_2\text{CO}$, $\geq 99.5\%$, Isolab), isopropyl alcohol (IPA, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, 99.9%, Isolab), and distilled water (DI) were used. Also, a self-design sample holder allowing homogenous current flow to substrates with a circular window diameter of 13 mm was designed for metallic Zn deposition and its anodization to obtain ZnO (see Fig. 1). Cholesterol, and Cholesterol Oxidase, *Streptomyces* sp. purchased and used in biosensor electrode modification (Sigma Aldrich, USA). All substances were employed as purchased and used without any further purification.

2.1. Electrochemical deposition of Zn onto ITO/glass

The ITO/glass plates were cut as square formed substrates with a dimension of $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$. The substrates were cleaned in an ultrasonic bath in acetone, IPA, and DI solvents, respectively, for 10 min to remove the remaining contaminants. Afterward, the deposition of metallic Zn was performed in a 0.3 M commercial $\text{ZnCl}_{2(\text{aq})}$ electrolyte under 0.1 V constant voltage for 20, 40, and 60 min at room temperature and under 100 rpm magnetic stirring. The Zn deposited samples were denoted as C20, C40, and C60, respectively where C stands for coating process. Additionally, the distance between the anode and the cathode electrodes was set as 10 cm in a two-electrode configuration setup (Figure 1). The Zn/ITO/glass samples were characterized to determine the optimum parameters of the Zn films to be used in the anodization.

2.2. Electrochemical anodization of Zn/ITO/glass

The electrochemical anodization process was carried out under 40 V constant voltage and in 5 mM $\text{KHCO}_{3(\text{aq})}$ electrolyte for different times (60, 70, 80, and 90 sec) at room temperature in a two-electrode configuration as represented in Figure 1 with Zn/ITO/glass substrates used as the anode and stainless steel as the cathode [16]. After anodization, a heat treatment procedure was applied to anodized samples at $300 \text{ }^\circ\text{C}$ for 1 hour in air, resulting in the transformation of oxide structures into crystalline structures. The anodized samples were denoted as A60, A70, A80, and A90 to cite anodization duration. After the completion of production steps, ZnO/Zn/ITO/glass samples were characterized.

2.3. Characterization

Structural and morphological properties of the deposited and anodized samples were characterized in detail, respectively. The phase structures of the samples were investigated by an X-ray diffractometer (Thermo Scientific ARL X'TRA, XRD) with a $\text{Cu-K}\alpha$ (1.54185 \AA) irradiation. Diffraction patterns were recorded at the scan rate of $2^\circ/\text{min}$ in the 2θ range $20^\circ\text{--}70^\circ$ at room temperature. The surface morphology and thickness of the samples were

examined by scanning electron microscopy (Carl Zeiss 300VP, SEM). The micrographs of the deposited samples were taken at magnifications of 10 kX and 25 kX, while 50 kX was used for the anodized samples with a secondary electron detector.

2.4. Formation of Electrodes and Cyclic Voltammetry Measurements

As previously mentioned, the electrode architecture and surface quality are one of the critical issues for the formation of bio sensing platform [18]. Due to the fact that samples having the best quality, in accordance with the structural and morphological characterization results, were determined as electrodes to be used in biosensor tests. In addition to the as determined ZnO/Zn/ITO/glass sample, platinum layers were deposited as well for the biosensing performance comparison using a simple approach [24]. Therefore, two samples, ZnO/Zn/ITO/glass and Pt/ZnO/Zn/ITO/glass were considered as cholesterol biosensor electrodes.

Cholesterol oxidase (ChOx) aqueous solutions (1 mg dl^{-1}) were prepared at room temperature under vigorous magnetic stirring and coated on the ZnO/Zn/ITO/glass and Pt/ZnO/Zn/ITO/glass electrodes via drop casting method. Subsequent to the ChOx coating, the electrodes were kept at 4°C for 12 hours. Afterwards the electrodes were washed with 50 mM phosphate buffer solution (PBS) to remove unbound ChOx enzymes [3]. Biosensor tests were conducted by using a three-electrode configuration in which ChOx modified ZnO/Zn/ITO/glass and Pt/ZnO/Zn/ITO/glass electrodes, platinum and Ag/AgCl were respectively used as working electrode, counter electrode and reference electrode to obtain cyclic voltammograms (CV). The 0, 5- and 10-mM electrolytes were prepared by dissolving cholesterol in ethanol/PBS (4:1) solution. CV were obtained at different concentrations (0, 5 and 10 mM) with a scan rate of 50 mV/s between -0.8 and +0.8 V potentials.

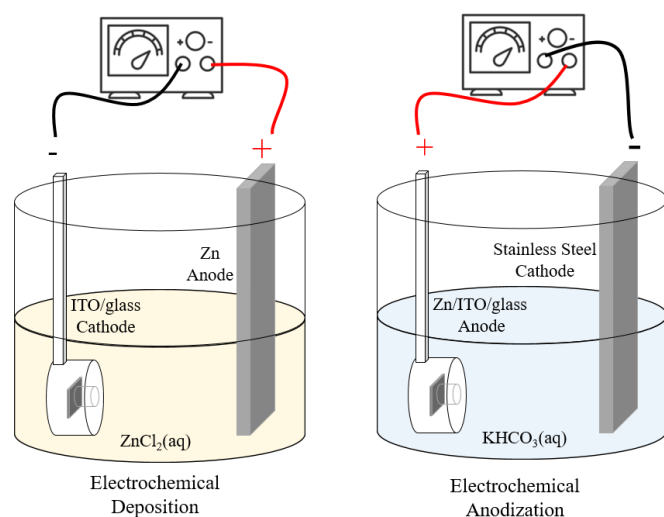


Figure 1. Demonstration of electrochemical deposition processes

3. Results and Discussion

The XRD patterns of metallic Zn films obtained by the electrochemical deposition method on ITO coated glasses used as a substrate are given in Figure 2a. When the XRD graphs were examined, characteristic peaks belonging to the cubic ITO phase matching the ICDD 01-089-4598 card number were seen at $\approx 21.8^\circ, 30.7^\circ, 33.3^\circ$ and 51.2° [25].

In addition, characteristic peaks belonging to the Zn film structure matching the ICDD 00-001-1238 card number were located at $\approx 36.6^\circ, 39.2^\circ, 43.5^\circ$, and 54.7° [26]. As expected, it was observed that the peaks of the ITO phase were suppressed by the Zn peaks due to the increasing film thickness as the deposition time increased from 20 to 40 min. Since it was observed that the electrochemical deposition which is applied for more than 40 minutes could not physically adhere to the substrate and peeled off. Therefore, the metallic Zn film process could not be carried out for longer than 40 minutes. As a result, the C40 sample represents the thickest Zn film that can be used for anodizing while maintaining uniformity and good adhesion to the substrate.

Consequence of the structural examination of the samples, the morphology of the C20 and C40 samples were investigated via SEM analysis. Upon examination of the SEM images, it was found that the thickness of the Zn films was approximately 600 nm after 20 minutes of deposition, and approximately 810 nm after 40 minutes of deposition. In addition, it can be seen that the surface is completely covered by the Zn film and the coating is homogeneous according to top-view images (Fig. 2 b-c inset). The examination of the morphology and thickness was hindered due to the peel of the coating observed in the Zn films deposited for more than 40 minutes. Based on the XRD and SEM results, the sample C40 was found to be the most suitable for the electrochemical anodization.

The XRD graphs of the samples subjected to electrochemical anodization for different periods after the electrochemical deposition process were given in Figure 3a. The characteristic peaks belonging to the ZnO structure matching the ICDD 01-079-0207 card number were seen at $\approx 30.7^\circ$, and 36.7° . While the Zn characteristic peaks decreased regularly during anodization due to the dissolution of the Zn film and its transformation into ZnO nanostructures, it was observed that the ZnO characteristic peaks continued to form up to 90 sec. After the exceed period from the 90 sec, it was observed that the existing Zn - ZnO structures completely dissolved, leaving only the ITO/glass structure behind.

The SEM images of the anodized samples were shown in Figure 3 b-c. The images demonstrate that dissolution occurs uniformly across the entire film surface of the samples exposed to anodization throughout between 60 and 90 sec. Moreover, it should be noted that the Zn films dissolves and disappears after being exposed to anodization for more than 90 sec. When the anodization time was 180 sec, the Zn/ZnO film structure was destroyed, leaving only the ITO film layer on the substrate. After 300 sec, the ITO film layer also peeled off from the glass substrate due to anodic potential.

As a result of these examinations, it was determined that the most suitable sample to be used in the electrochemical detection of ChOx, was determined as the sample coded A70 owing to obtained structural and morphological properties. Cyclic voltammograms of ZnO/Zn/ITO/glass and Pt/ZnO/Zn/ITO/glass electrodes in electrolytes with various cholesterol concentration were represented in Figure 4a and Figure 4b. When the cyclic voltammograms of ZnO/Zn/ITO/glass were considered the relationship between the current obtained and the cholesterol concentration ranging from 0 to 10 mM were found to be linear with an R^2 value of 0.9732. The limit of detection the ZnO/Zn/ITO/glass electrode for cholesterol was calculated as $0.98 \times 10^{-3} \text{ M}$. Similar to Pt free sample a linear relation between cholesterol concentration and the current was observed for Pt/ZnO/Zn/ITO/glass electrode with an R^2 value of 0.974 as shown in Figure 4b. Slightly better detection limit was obtained for the Pt/ZnO ITO electrode as $0.965 \times 10^{-3} \text{ M}$.

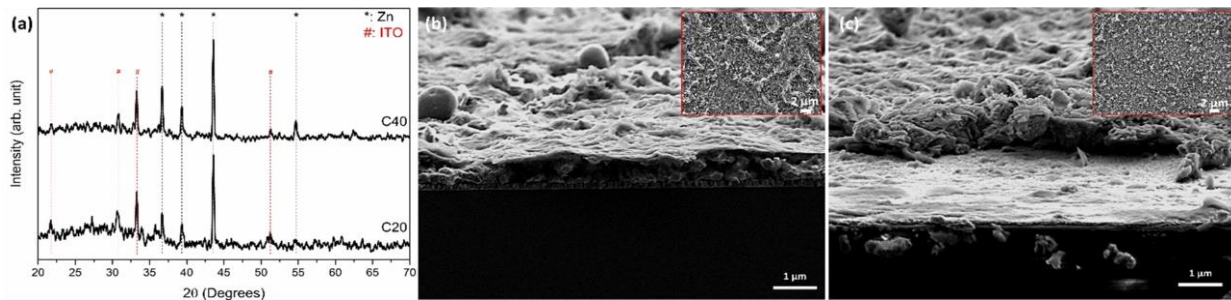


Figure 2. (a) XRD pattern of the deposited samples, SEM images of the Zn coated ITO glass for (b) 20 min, (c) 40 min, and the top view images of the samples given in insets.

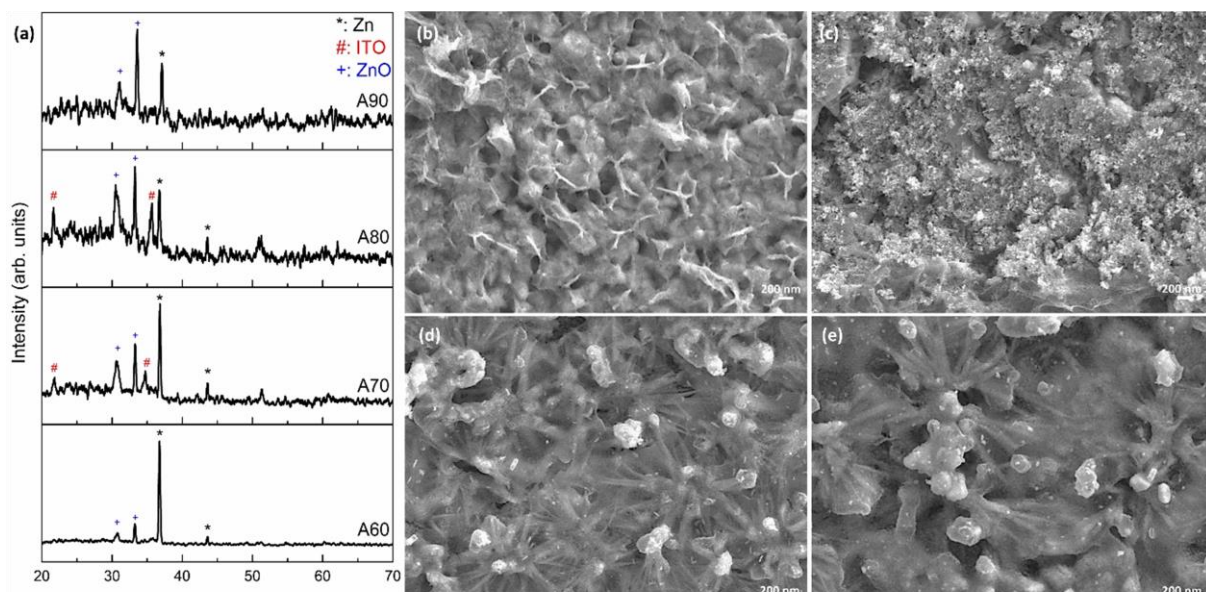


Figure 3. (a) XRD pattern of the anodized samples, SEM images of the anodized ZnO nanostructures for (b) 60 min, (c) 70 min, (d) 80 min, and (e) 90 min.

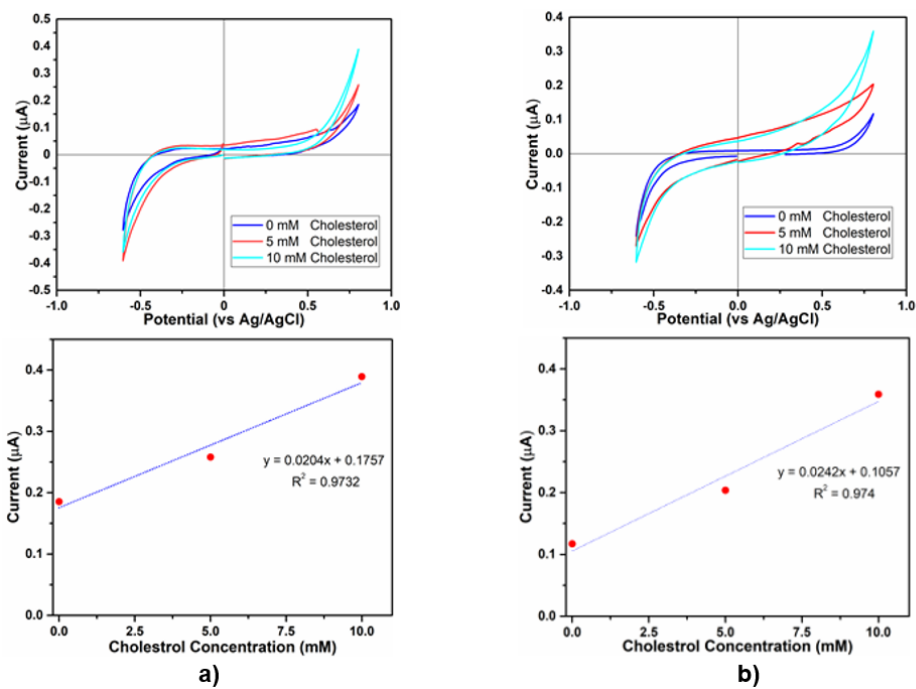


Figure 4. Cyclic voltammograms of ZnO/Zn/ITO/glass electrode (a) and Pt/ZnO/Zn/ITO/glass electrode (b).

The cyclic voltammograms results indicates that as developed structures can detect the presence of the cholesterol. Compared to the investigated studies in a recently published review it can be inferred that the obtained results of the present study are promising since the obtained cholesterol detection limits are partly close to the reported studies [18]. Although, in the review of Kumar et al., there are studies denoting the ZnO based biosensors in which the cholesterol detection limits lay between 10^{-3} M to 10^{-9} M levels, the proposed practical way of electrode development process of the study can be considered as a motivation for the development of low-cost biosensor electrodes in which stability and growth of ZnO nanostructure can be elaborately controlled.

4. Conclusions

In this study electrochemical deposition and electrochemical anodization processes were successfully performed in order to obtain Zn and ZnO layers respectively on ITO/glass substrates under various processing parameters. As obtained structures were converted in to two different electrodes as ZnO/Zn/ITO/glass and Pt/ZnO/Zn/ITO/glass for the electrochemical detection of cholesterol. The electrodes, prepared for the cholesterol detection, exhibited linear relation between the electrochemical current and cholesterol concentrations of electrolytes. The prepared electrodes had a limit of detection of approximately 10^{-3} M, which is relatively high in comparison to the reported results have lower limit of detection in the literature. The results suggest that future studies can develop highly sensitive biosensor electrodes by studying the effect of different types of parameters of low-cost and practical processes on the structural and morphological changes on the surfaces of the electrodes. Apart from the biosensing performance the study proposed a novel approach which does not require expensive infrastructure and raw material cost to develop ZnO based biosensors.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

This article does not require ethics committee approval.

This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

Acknowledgment

The authors are indebted to the infrastructural support from Dokuz Eylül University and İzmir Katip Çelebi University. This study was supported by the Dokuz Eylül University Scientific Research Coordination Unit. Project Number: 2019.KB.FEN.029.

Author Contribution Statement

M.E. as the project coordinator designed the experiments and required setups together with the assistance of project researchers A.A., M.Y. and T.D.. U.K., B.U. and E.T.Ö. performed the experiments and the characterizations. M.E. took the lead in writing the manuscript. All authors provided critical feedback and helped shape the research, analysis and manuscript.

References

- [1] Duan, Y., Gong, K., Xu, S., Zhang, F., Meng, X., Han, J. 2022. Regulation of cholesterol homeostasis in health and diseases: from mechanisms to targeted therapeutics, *Signal Transduction and Targeted Therapy*, Vol. 7, s. 1-29. DOI: 10.1038/s41392-022-01125-5
- [2] Dhand, C., Singh, S.P., Arya, S.K., Datta, M. Malhotra, B.D. 2007. Cholesterol biosensor based on electrophoretically deposited conducting polymer film derived from nano-structured polyaniline colloidal suspension, *Analytica Chimica Acta*, Vol 602, s. 244-251. DOI: 10.1016/j.aca.2007.09.028
- [3] Khan, R., Kaushik, A., Solanki, P.R., Ansari, A.A., Pandey, M.K., Malhotra, B.D. 2008. Zinc oxide nanoparticles-chitosan composite film for cholesterol biosensor, *Analytica Chimica Acta*, Vol. 616, s. 207-213. DOI: 10.1016/j.aca.2008.04.010
- [4] G. Jayanthi, K., S.K., S. 2020. Cholesterol oxidase immobilized inulin-based nanocomposite as the sensing material for cholesterol in biological and food samples, *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 140, s. 1-13. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2020.109631
- [5] Yoon, J., Cho, H.-Y., Shin, M., Choi, H.K., Lee, T., Choi, J.-W. 2020. Flexible electrochemical biosensors for healthcare monitoring, *Journal of Materials Chemistry B*, Vol. 8, s. 7303-7318. DOI: 10.1039/D0TB01325K
- [6] Zhu, H., Han, Q., Zhang, D., Wang, Y., Gao, J., Geng, W., Yang, X., Chen, X. 2018. A diagnostic model for minimal change disease based on biological parameters, *PeerJ*, Vol. 6, s. 1-12. DOI: 10.7717/peerj.4237
- [7] Saxena, U., Das, A.B. 2016. Nanomaterials towards fabrication of cholesterol biosensors: Key roles and design approaches, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 75, s. 196-205. DOI: 10.1016/j.bios.2015.08.042
- [8] Aykaç, A., Gergeroglu, H., Beşli, B., Akkaş, E.Ö., Yavaş, A., Güler, S., Güneş, F., Erol, M. 2021. An Overview on Recent Progress of Metal Oxide/Graphene/CNTs-Based Nanobiosensors, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 16, s. 1-19. DOI: 10.1186/s11671-021-03519-w
- [9] Güneş, F., Aykaç, A., Erol, M., Erdem, Ç., Hano, H., Uzumbayir, B., Şen, M., Erdem, A. 2022. Synthesis of hierarchical hetero-composite of graphene foam/ α -Fe₂O₃ nanowires and its application on glucose biosensors, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 895, s. 1-10. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.162688
- [10] Aykaç, A., Tunç, I.D., Güneş, F., Erol, M., Şen, M. 2021. Sensitive pH measurement using EGFET pH-microsensor based on ZnO nanowire functionalized carbon-fibers, *Nanotechnology*, Vol. 32, s. 1-8. DOI: 10.1088/1361-6528/ac0666
- [11] Tunç, I.D., Erol, M., Güneş, F., Sütçü, M. 2020. Growth of ZnO nanowires on carbon fibers for photocatalytic degradation of methylene blue aqueous solutions: An investigation on the optimization of processing parameters through response surface methodology/central composite design, *Ceramics International*, Vol. 46, s. 7459-7474. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.244
- [12] Chaudhary, S., Umar, A., Bhasin, K., Baskoutas, S. 2018. Chemical Sensing Applications of ZnO Nanomaterials, *Materials*, Vol. 11, s. 1-38. DOI: 10.3390/ma11020287
- [13] Beitollahi, H., Tajik, S., Garkani Nejad, F., Safaei, M. 2020. Recent advances in ZnO nanostructure-based electrochemical sensors and biosensors, *Journal of Materials Chemistry B*, Vol. 8, s. 5826-5844. DOI: 10.1039/D0TB00569j
- [14] AYKAÇ, A. 2019. Elektrokimyasal Anotlama Yöntemiyle ZnO Nanotellerin Üretilmesi ve Fotokatalitik Aktiviteleri, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Vol. 21, s. 67-71. DOI: 10.21205/deufmd.2019216107
- [15] Aykaç, A., Akkaş, E.Ö. 2023. Synthesis, Characterization, and Antibacterial Properties of ZnO Nanostructures Functionalized Flexible Carbon Fibers, *Recent Patents on Nanotechnology*, Vol. 17, s. 119-130. DOI: 10.2174/1872210516666220414103629
- [16] Yavaş, A., Güler, S., Erol, M. 2020. Growth of ZnO nanoflowers: effects of anodization time and substrate roughness on structural, morphological, and wetting properties, *Journal of the Australian Ceramic Society*, Vol. 56, s. 995-1003. DOI: 10.1007/s41779-019-00440-5
- [17] Ozdemir, E.T., Kartal, U., Dikici, T., Erol, M., Yurddaskal, M. 2021. A comparative study on structural, morphological and photocatalytic properties of anodically grown ZnO nanowires under varying parameters, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 32, s. 27398-27408. DOI: 10.1007/s10854-021-07115-7
- [18] Kumar, B., Poddar, S., Sinha, S.K. 2022. Electrochemical cholesterol sensors based on nanostructured metal oxides: Current progress and future perspectives, *Journal of the Iranian Chemical Society*, Vol. 19, s. 4093-4116. DOI: 10.1007/s13738-022-02605-9
- [19] Wu, Q., Hou, Y., Zhang, M., Hou, X., Xu, L., Wang, N., Wang, J., Huang, W. 2016. Amperometric cholesterol biosensor based on zinc oxide films on a silver nanowire-graphene oxide modified electrode, *Analytical Methods*, Vol. 8, s. 1806-1812. DOI: 10.1039/C6AY00158K
- [20] Batra, N., Tomar, M., Gupta, V. 2013. Efficient detection of cholesterol using ZnO thin film-based matrix, *Journal of Experimental Nanoscience*, Vol. 8, s. 280-287. DOI: 10.1080/17458080.2012.671542
- [21] Izyumskaya, N., Tahira, A., Ibupoto, Z.H., Lewinski, N., Avrutin, V., Özgür, Ü., Topsakal, E., Willander, M., Morkoç, H. 2017. Review—Electrochemical Biosensors Based on ZnO Nanostructures, *ECS Journal of Solid-State Science and Technology*, Vol. 6, s. Q84-Q100. DOI: 10.1149/2.0291708jss
- [22] Aydın, E.B., Sezgintürk, M.K. 2017. Indium tin oxide (ITO): A promising material in biosensing technology, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 97, s. 309-315. DOI: 10.1016/j.trac.2017.09.021
- [23] Umar, A., Rahman, M.M., Vaseem, M., Hahn, Y.-B. 2009. Ultra-sensitive cholesterol biosensor based on low-temperature grown ZnO

- nanoparticles, *Electrochemistry Communications*, Vol. 11, s. 118–121. DOI: 10.1016/j.elecom.2008.10.046
- [24] Syrokostas, G., Govatsi, K., Leftheriotis, G., Yannopoulos, S.N. 2019. Platinum decorated zinc oxide nanowires as an efficient counter electrode for dye sensitized solar cells, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 835, s. 86–95. DOI: 10.1016/j.jelechem.2019.01.013
- [25] Khalid, S., Malik, M.A., Lewis, D.J., Kevin, P., Ahmed, E., Khan, Y., O'Brien, P. 2015. Transition metal doped pyrite (FeS₂) thin films: structural properties and evaluation of optical band gap energies, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 3, s. 12068–12076. DOI: 10.1039/C5TC03275J
- [26] Skowronski, L., Ciesielski, A., Olszewska, A., Szczesny, R., Naparty, M., Trzcinski, M., Bukaluk, A. 2020. Microstructure and Optical Properties of E-Beam Evaporated Zinc Oxide Films—Effects of Decomposition and Surface Desorption, *Materials*, Vol. 13, s. 1–17. DOI: 10.3390/ma13163510



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' Reaksiyonu İçin Ortalama Serbest Yol Değişimlerinin Güneş Tutulması Süresince İncelenmesi

Investigation of Mean Free Path Changes for the 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' Reaction During the Solar Eclipse

Mehmet Yaşar ^{1*}, Murat Canyılmaz ²

¹ Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE

² Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik ve Elektronik, Elazığ, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: mehmetyasar@firat.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, Ukrayna/Kharkiv şehri üzerinde gözlemlenen 29 Mart 2006 tarihindeki parçalı güneş tutulmasına, iyonküre kimyasında önemli reaksiyonlardan biri olan 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' çarpışması için hesaplanan ortalama serbest yol verilerinin tepkisi incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan datalar, NRLMSISE-00 atmosfer modelden ve Kharkov saçılma radarından elde edildi. Bu çalışmanın konusu olan ortalama serbest yol verilerinin hesabında kullanılan çarpışma tesir kesitleri, klasik metot kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, ortalama serbest yolun iyonküresel yükseklik artışı ile arttığı görüldü. Tutulma gününde ortalama serbest yol değişimlerinde görülen karışıklıkların, üst yüksekliklere doğru azaldığı tespit edildi. Bu durumun sebebinin, reaksiyonu oluşturan nötr O₂ yoğunluğunun artan yükseklikle beraber azalması ve alt iyonküresel bölgelerdeki dış mekanizmaların daha etkin olması gibi sebeplerden dolayı kaynaklandığı söylenebilir. Ortalama serbest yol modeli sonuçları neticesinde minimum değerler tutulma zamanı içinde görüldü.

Anahtar Kelimeler: Güneş tutulması, Dünya iyonküresi, İyonküresel reaksiyon süreçleri

Abstract

In this work, the response of the mean free path calculated for the 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' collision, which is an important reaction in the ionosphere chemistry, to partial solar eclipse on March 29, 2006 observed over Ukraine/Kharkiv was analysed. The data were obtained from the NRLMSISE-00 atmosphere model and the Kharkov scattering radar. Collision cross sections used in the calculation of mean free path data, which is the subject of this study, were calculated using the classical method. It was observed that the mean free path increased with ionospheric height. The disturbances seen in the mean free path changes on the day of the eclipse decreased towards the upper heights. It can be said that the reason for this situation is due to the decrease in the neutral O₂ density that creates the reaction with increasing altitude and the external mechanisms in the lower ionosphere regions being more effective. As a result of the mean free path model results, the minimum values were seen within the eclipse time.

Keywords: The solar eclipse, Earth ionosphere, The ionospheric reaction processes

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Ionosphere chemistry has a sensitive structure that is affected by internal processes through the interactions of particles with each other and by external processes through events such as earthquakes, meteor showers, the earth's magnetic field, solar flares, and solar eclipses. These internal and external effects cause short, medium and long-term disturbances in the ionosphere. Solar eclipses are one of the important events that create short and medium-scale disturbances on the world's ionosphere [1]. Methods such as gravitational waves, total electron content, doppler technique, critical frequency changes, scattering radar techniques are used to examine the effects of solar eclipses on the ionosphere [2-6]. Scattering radars are one of the measurement-based techniques used to study the ionosphere-eclipse interaction.

The O⁺ ion is one of the most dominant particles in the E and F regions of the ionosphere. Examining O⁺ ion-based reactions, which are converted into molecular ions through reactions such as 'O⁺ + N₂' and 'O⁺ + O₂', will provide important information on the shaping of particle densities, especially in the E and F regions. In this study, the effect of the solar eclipse on March 29, 2006 on the mean free path model results obtained with data from the NRLMSISE-00 atmospheric model and the Kharkov Incoherent Scatter Radar for the 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' reactive collision was examined.

Materials and Methods

March 29 solar eclipse;

The solar eclipse observed on Wednesday, March 29, 2006 started with a band in Brazil, continued along the Atlantic ocean and ended in Kazakhstan. Ukraine is one of the centers where this

solar eclipse was recorded as a partial eclipse with an occultation rate of approximately 77.4%. The beginning and ending times of the partial eclipse for Kharkiv city, Ukraine are 13.02 and 15.21 local time, respectively [1, 10].

Mean free path model;

The path taken by a particle between two consecutive collisions is called as the mean free path. The mean free path is as given below;

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma}$$

Here, N is the particle density and σ is the collision cross section [12].

NRLMSISE-00 atmosphere model;

NRLMSISE-00 is an experimental and globally referenced atmospheric model of the Earth from Earth to space. Outputs of the model; In addition to He, O, O₂, N, N₂, Ar, H densities, it includes total mass density, anomalous oxygen density, exospheric and temperatures with altitude [13].

Conclusion

As a result of the results obtained, it is thought that the reason why the maximum value of the mean free path is observed after the end of the partial eclipse at altitudes of 209 and 242 km compared to other altitudes is due to the fact that the rate of decrease in O₂ density is less than at other altitudes and the density is quite high at these two altitudes.

It can be said that the reason why the two maximum peaks observed at the lower altitudes are replaced by a single minimum trough at the upper altitudes is due to the decrease in the effect of the O₂ concentration obtained by semi-experimental methods as we move up to the upper altitudes and the fluctuations in the density at the lower altitudes.

The complexity seen in changes at lower elevations decreases towards upper elevations; It can be suggested that occurs because the processes affecting the lower ionosphere are more effective than in the upper ionosphere and the O₂ concentration is higher in the lower ionosphere.

1. Giriş

İyonküre kimyası, içinde bulundurduğu elektron, iyon ve nötr bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri vasıtasıyla iç süreçlerden, depremler, meteor yağmurları, yerin manyetik alanı, güneş patlamaları, güneş tutulmaları vs. gibi olaylar aracılığıyla da dış süreçlerden etkilenen hassas bir yapıya sahiptir. Bu iç ve dış kaynaklı etkiler, iyonkürede kısa, orta ve uzun süreli bozulmalara neden olurlar. Güneş tutulmaları, dünya iyonküresi üzerinde kısa ve orta ölçekli tedirginliklerin meydana geldiği önemli olaylardan biridir. Bu olaylar, iyonkürede tutulma kaynaklı oluşan bozulmaların araştırılması noktasında önemli fırsatlar sunar [1]. Özellikle tutulma başlangıcından, maksimum örtülme anına ve tutulmanın bitişi ile sonrasında meydana gelebilecek süreçlerin iyonküre üzerindeki etkilerinin araştırılması ve değerlendirilmesi, iyonküre kimyasının daha anlaşılır olmasına büyük katkılar sağlamaktadır.

İyonküre üzerinde güneş tutulması etkilerinin incelenmesi noktasında gerek teorik gerekse de deneysel metotlar kullanılmaktadır. Yerçekimi dalgaları, toplam elektron içeriği, doppler tekniği, kritik frekans değişimleri, saçılma radar teknikleri bu metotlardan bazılarıdır [2-6]. İyonküre-güneş tutulması etkileşiminin araştırılmasında her ne kadar teorik ya da yarı-teorik modellemeler/araçlar yaygın bir şekilde kullanılıyor olsa da, ölçüme dayalı metotların kullanılması, bu etkileşim sonuçlarının daha anlaşılır olmasına katkı sağlayacaktır. Teorik/yarı teorik metotlara erişim daha kolayken, deneysel ölçüm araçlarına ulaşım hem maddi hem de tam veri setlerine ulaşamaması gibi sebeplerden dolayı daha zor ve zaman alıcıdır. Değinen bu gibi nedenlerden dolayı ölçüm teknikleri ile yapılan çalışmaların önemi bir kat daha artmaktadır. Saçılma radarları, iyonküre-tutulma etkileşiminin incelenmesinde başvurulan ölçüme dayalı tekniklerden biridir. Bağlantısız saçılma radarları (incoherent scatter radar) iyonosferik süreçlerin araştırılmasında olağanüstü fırsatlar sunmasının yanında geniş kapsama alanı ve çoklu parametrelerin eş zamanlı ölçümleri gibi pek çok avantaja sahiptirler. Arecibo (Ioannidis ve Farley 1972) ve Jicamarca (Farley 1991) radarları en eski saçılma radarları olarak 1962 den beri rutin bir şekilde çalışmalarını sürdürmektedirler. Günümüz dünyasında Amerika'da, Asya'da, kuzey ve doğu Avrupa'da (Kharkiv ISR) konumlanmış saçılma radarları bulunmaktadır [7]. Ukrayna'nın

Kharkiv şehrinde kurulu saçılma radarı 25 metrelik yönlendirilebilir ve 100 metrelik sabit dikey bir çanak ile 150MHz frekansta çalışma imkânına sahiptir. Bu radar, Dünya iyonküresinde fiziksel ve kimyasal süreçlerin araştırılmasına ve incelenmesine büyük katkı sağlamaktadır. Son yıllarda iyonküre üzerinde ani, orta ve uzun ölçekli bozulmalarda önemli etkenlerden biri olan güneş tutulmasının iyonküresel çarpışma süreçleri üzerindeki etkilerinin incelenmesinde Kharkiv saçılma radarı data setlerinden faydalanılarak araştırmalar sürdürülmektedir [1, 8-9].

İyonküresel reaksiyon süreçleri serbest iyon, elektron ve nötr parçacıkların dağılımları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu parçacıkların dağılımı iyonküresel yükseklik ve bölgelere göre değişim göstermektedir. O⁺ iyonu iyonkürenin E ve F bölgelerinde en baskın parçacıklarından biridir. 'O⁺ + N₂' ve 'O⁺ + O₂' gibi reaksiyonlar vasıtasıyla moleküler iyonlara dönüştürülen O⁺ iyonu tabanlı reaksiyonların incelenmesi özellikle E ve F bölgelerindeki parçacık yoğunluklarının şekillenmesi üzerinde önemli bilgiler sağlayacaktır. İyonküre kimyası hem kendi içindeki çarpışma süreçleri hem de güneş tutulmaları gibi önemli dış kaynaklı olaylardan etkilenmektedir. İyonkürede meydana gelen bir çarpışmaya ait nümerik sonuçların, tutulma olayı ile etkileşiminin incelendiği bu çalışma ile iyonküre kimyasının daha anlaşılır olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada iyonküresel çarpışma süreçlerinden biri olan 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' reaktif çarpışma için NRLMSISE-00 atmosfer modelden elde edilen nötr yoğunluklar ve Kharkov Incoherent Scatter Radar'dan alınan ölçüm verileri ile elde edilen ortalama serbest yol model sonuçları üzerindeki 29 Mart 2006 da meydana gelen güneş tutulmasının etkisi incelenmiştir.

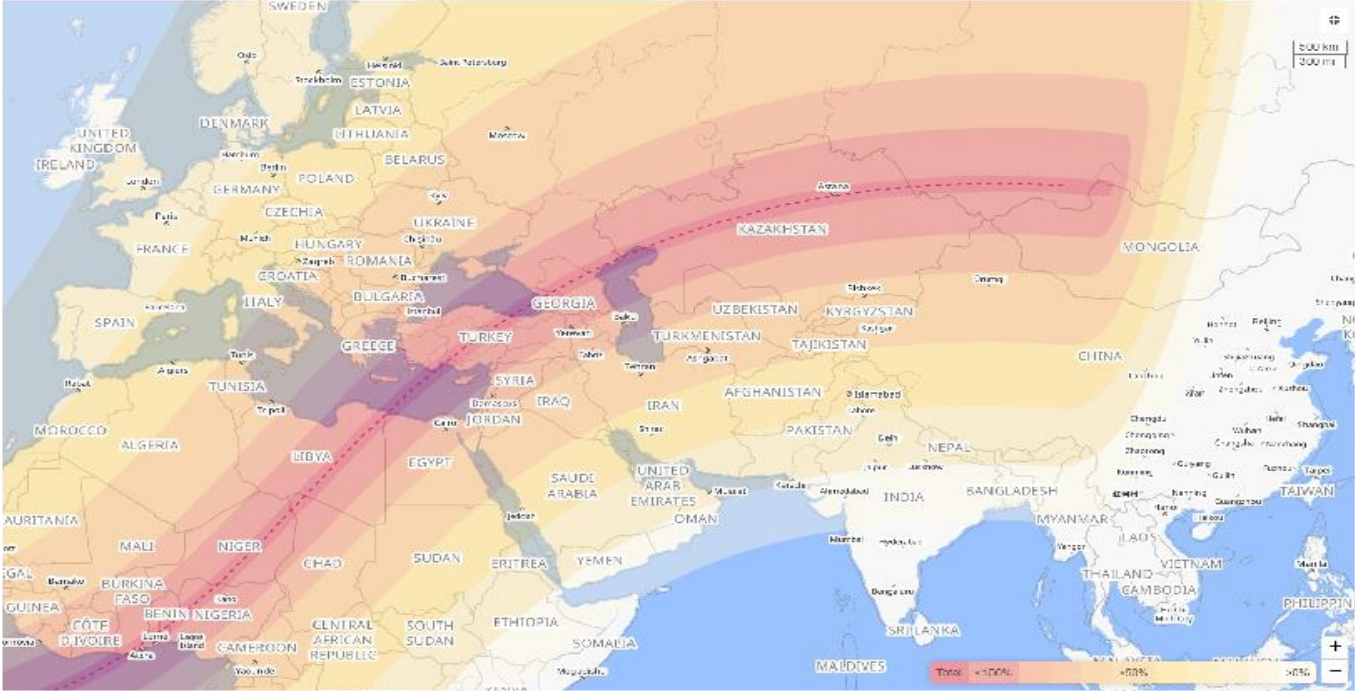
2. Materyal ve Metot

2.1. 29 Mart güneş tutulması

29 Mart 2006 Çarşamba günü gözlemlenen güneş tutulması, Brezilya'dan bir bantla başlayarak Atlantik Okyanusu boyunca devam ederek Kazakistan'da sona ermiştir. Bu güneş tutulması, Avrupa'da parçalı tutulma olarak gözlemlenmiştir. 29 Mart 2006 güneş tutulması, yaklaşık % 77.4 lük örtülme oranı ile parçalı tutulma olarak kayıtlara geçtiği merkezlerden biride Ukrayna'dır. 29 Mart güneş tutulması, bu çalışmanın ana temasını oluşturan Ukrayna'nın Kharkiv şehrinde yerel zaman dilimine göre (YZ)

13.02 civarında başlamış ve 15.21 civarında sona ermiştir. Tutulma toplamda 2 saat 18 dakika sürerek, güneş diskinin maksimum örtülme zamanı yaklaşık 14.15 (YZ) civarında

meydana gelmiştir [1, 10]. 29 Mart güneş tutulmasının genel seyri şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 29 Mart 2006 güneş tutulmasının izlediği yol [11]

Figure 1. The path of the solar eclipse of March 29, 2006 [11]

2.2. Ortalama serbest yol modeli

Birbirini takip eden iki ardışık çarpışma arasında bir parçacığın aldığı yol, ortalama serbest yol olarak adlandırılır. Başka bir deyişle tek bir parçacığın iki ardışık çarpışması arasındaki ortalama mesafe, ortalama serbest yoldur. Böylece, ortalama serbest yol aşağıda verildiği gibidir;

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma} \quad (1)$$

Burada N; parçacık yoğunluğunu, σ ; çarpışma tesir kesitini ifade eder. Bu denklem, ortalama serbest yolun parçacıkların yoğunluğuna ve çarpışma tesir kesitlerine bağlı olduğunu gösterir [12].

Denklem 1'deki ortalama serbest yol verilerinin elde edilme sürecinde, nötr yoğunluklar (N) NRLMSISE-00 atmosfer modelden alınırken, bir reaksiyonda iki parçacık arasında meydana gelen etkileşim olasılığı ile orantılı niceliğin tanımı olarak ifade edilen çarpışma tesir kesitleri (σ) ise en temel haliyle;

$$\sigma = \int_0^\pi dx \sin x \int_0^{2\pi} d\epsilon S(gx) = \int_0^\pi dx \sin x \int_0^{2\pi} d\epsilon \frac{d^2}{4} = \pi d^2 \quad (2)$$

Olarak hesaplanır. Burada d, çarpışma yada etki parametresi olarak tanımlanır.

2.3. NRLMSISE-00 model

NRLMSISE-00, yeryüzünden uzaya kadar olan bölgede dünyanın deneysel ve küresel referanslı atmosfer modelidir. Dünya

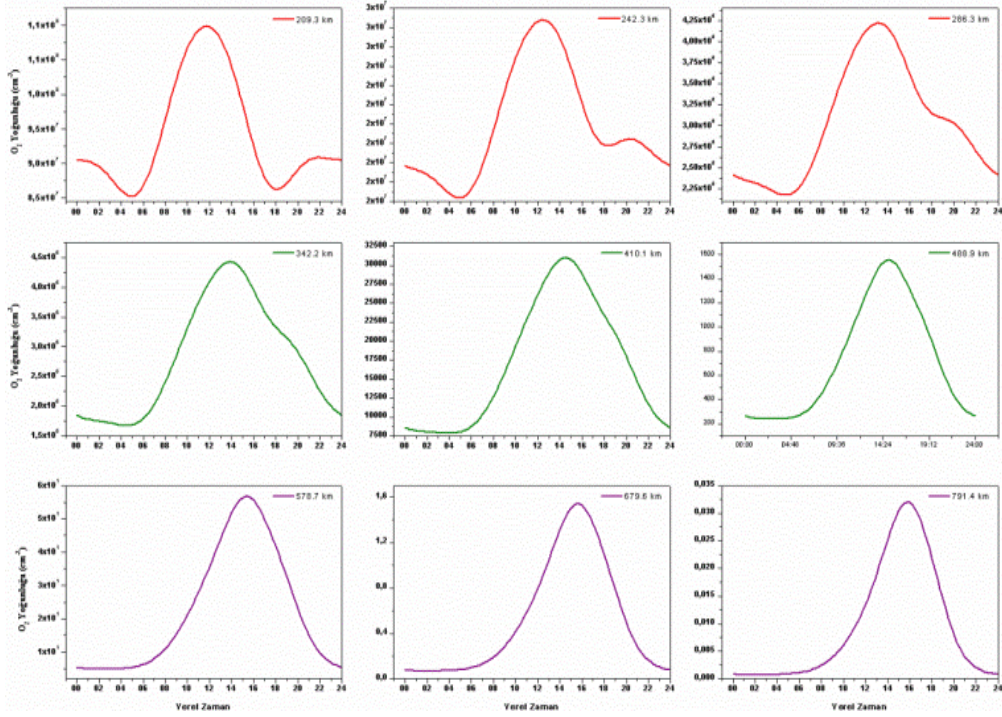
atmosferinin sıcaklık ve yoğunluk bileşenlerinin çıktılarını kullanıcılara sağlayan bir modeldir. Bu modelin kullanım amacı, atmosferik sürüklenmeye bağlı olarak uydusal yörünge bozulmalarının tahmin edilmesine yardımcı olmaktır. Model aynı zamanda gök bilimciler tarafından lazer kılavuz yıldızlarının lazer olmayan teleskoplar üzerindeki etkisini değerlendirmek için teleskoplar ve lazer ışınları arasındaki hava kütlelerini hesaplamak içinde kullanılmıştır.

Modelin çıktıları; He, O, O₂, N, N₂, Ar, H yoğunluklarına ilaveten, toplam kütle yoğunluğu, anormal oksijen yoğunluğu, ekzosferik ve yüksekliğe göre sıcaklıkları ihtiva etmektedir [13].

3. Bulgular

Bu çalışmada, 'O⁺ + O₂ → O₂⁺ + O' reaksiyonuna ait ortalama serbest yol modeline ait sonuçlar 49.6 °E; 36.3 °N coğrafi koordinatları için elde edildi. Bu dinamikler 29 Mart 2006 güneş tutulması günü, 209, 242, 286, 342, 410, 488, 578, 679 ve 791 km'lik yükseklik değerleri ve yerel zaman diliminde saat 00.00'dan 24.00'a kadar 15'er dakikalık zaman aralıkları için hesaplandı. Bu hesaplamalarda iyonküresel yoğunluklar NRLMSISE-00 atmosfer modelden, sıcaklık değerleri de Kharkov IS radardan alındı.

Şekil 2'de, 29 Mart 2006 tarihinde NRLMSISE-00 modelden elde edilen O₂ nötr yoğunluğuna ait değişimler verilmiştir.



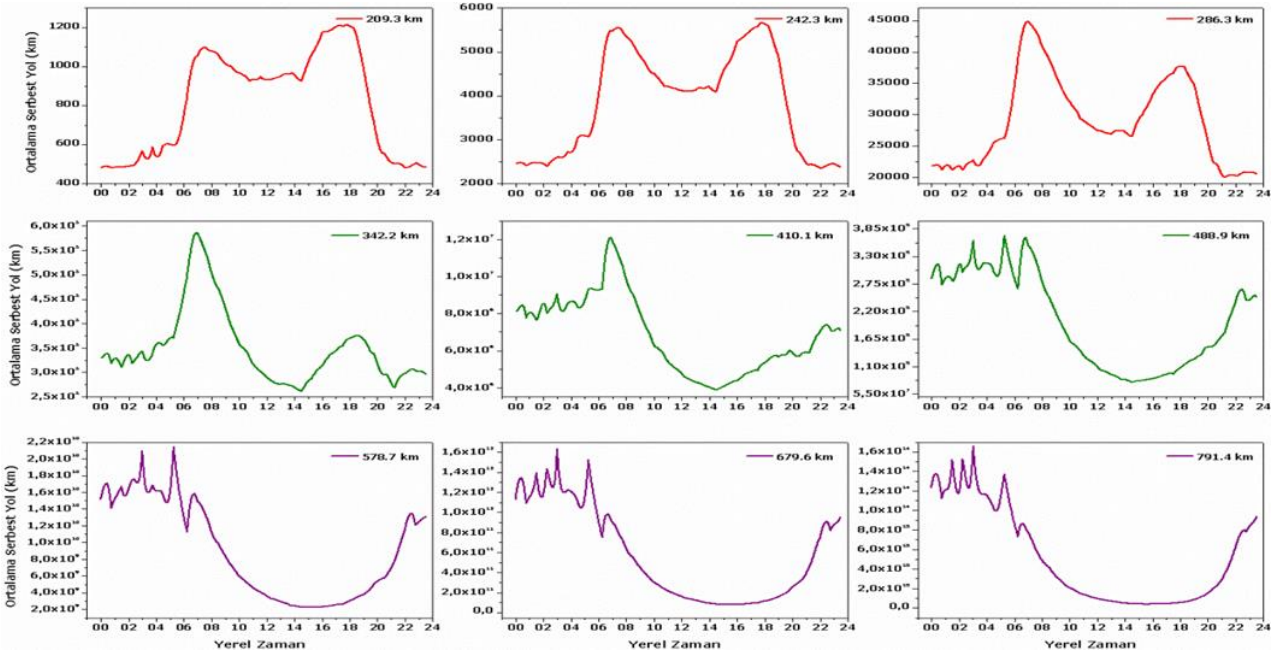
Şekil 2. 29 Mart 2006 tarihinde O_2 yoğunluğunun yükseklik ve zamanla değişimi

Figure 2. Change of O_2 density with altitude and time on March 29, 2006

3.1. Ortalama serbest yol model sonuçları

Rudolf Clausius tarafından gaz kinetik teoriye kazandırılan bu model, kinetik teori gelişiminin hızlanmasını sağlamıştır. Bu sebeple bir parçacığın ortalama serbest yolunun tahmini çarpışmalar esnasında kat ettiği mesafenin bulunması ile birlikte farklı çarpışma dinamiklerinin daha basit bir şekilde

hesaplanmasını da sağlayacaktır. Buradan hareketle, 29 Mart güneş tutulması gününde hesaplanan ortalama serbest yol değerlerinin iyonosferik yükseklik ve yerel zamanla değişimi Şekil 3' te gösterilmiştir.



Şekil 3. Ortalama serbest yolun zaman ve yükseklikle değişimi

Figure 3. Variation of mean free path with time and height

Şekil 3'te ortalama serbest yolun maksimum değeri 209 ve 242. km'lik yükseklikler için tutulmadan sonra görülürken, diğer yüksekliklerde tutulmadan önce görülmüştür. 209 km den 342 km ye kadar olan dört yükseklikte iki maksimum nokta gözlemlenirken, 410. km den 791. km ye kadar olan diğer beş yükseklikte bu maksimumlar yerlerini minimum bir çukura bırakmıştır. İlk dört yükseklik için (209, 242, 286, 342 km) özellikle tutulma başlangıcından tutulmanın sona ermesine kadar var olan değişimlerin, diğer yüksekliklerde görülen değişimlere kıyasla daha karmaşık olduğu tespit edilmiştir.

209 km den 791 km ye kadar olan tüm yüksekliklerde güneş diskinin maksimum örtülme zamanı olan 14.13 civarında ortalama serbest yol değişimlerinde bir azalmanın olduğu görülmektedir.

4. Sonuç ve Tartışma

Elde edilen sonuçlar neticesinde diğer yüksekliklere nazaran 209 ve 242 km lik yüksekliklerde ortalama serbest yolun maksimum değerinin parçalı tutulmanın bitişinden sonra görülme sebebinin, O₂ yoğunluğundaki düşüş hızının diğer yüksekliklere göre daha az olması ve yoğunluğun bu iki yükseklikte oldukça fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yine alt yüksekliklerde gözlemlenen iki maksimum tepe noktalarının üst yüksekliklerde yerini tek bir minimum çukura bırakma sebebinin, yarı deneysel yöntemlerle elde edilen O₂ yoğunluğunun üst yüksekliklere doğru çıkıldıkça etkisinin azalması ve alt yüksekliklerde yoğunlukta görülen dalgalanmalardan dolayı olduğu söylenebilir.

Alt yüksekliklerdeki değişimlerde görülen karmaşıklığın üst yüksekliklere doğru azalması, alt iyonküre üzerinde etkili olan süreçlerin üst iyonküreye göre daha etkin olması ve özellikle de bu çalışmanın ana teması olan ortalama serbest yol hesabının temel bileşenlerinden biri olan O₂ yoğunluğunun alt iyonküredeki fazlalığından kaynaklı nedenlerden olduğu ileri sürülebilir.

Üst İyonosferik yüksekliklere doğru çıkıldıkça ortalama serbest yolun ciddi şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Alt iyonkürede 10³ seviyesinde olan ortalama serbest yolun üst bölgelerde 10¹⁵ seviyelerine çıktığı elde edilen sonuçlardan tespit edilen bir durumdur. Bu sonuç elektron ortalama serbest yolunun hesaplandığı bir diğer çalışmada [14], elde edilen neticelerle uyum göstermektedir. Yapılan çalışmada ortalama serbest yolun 10⁴ km seviyesinden başlayarak 10¹⁶ km'lik mertebelere çıktığı bulunmuştur.

Parçalı güneş tutulması süresince 'O⁺ + O₂' çarpışması için hesaplanan ortalama serbest yol verilerinin yerel zaman ve iyonküresel yükseklik gibi bağımsız parametrelere göre değişimlerinin incelendiği bu çalışma için aşağıdaki sonuçlar elde edildi;

- Yükseklik artışı ile birlikte ortalama serbest yolda artmıştır.
- Artan yükseklikle beraber ortalama serbest yol değişimlerinde görülen karmaşıklığın azaldığı tespit edildi.
- Alt bölgelerde, yer yer inişli çıkışlı davranışlar gösteren ortalama serbest yol verilerinin, yerini üst bölgelerde daha yumuşak değişimlere bıraktığı görüldü.
- Ortalama serbest yol, tüm yüksekliklerde maksimum örtülme zaman aralığı içinde azalma göstermiştir.
- 29 Mart gününde ortalama serbest yolun minimum değeri, parçalı tutulma zamanı içinde görülmüştür.

Reaksiyon hız sabiti, çarpışma tesir kesiti, ortalama serbest yol, toplam çarpışma sayısı, çarpışma frekansı vb. gibi reaksiyon dinamikleri ile Dünya iyonküresini etkileyen süreçler arasındaki etkileşimlerinin incelendiği bilimsel çalışmaların azlığından kaynaklı sebepler literatür karşılaştırmasını kısıtlı kılmaktadır. İyonküre kimyasının daha anlaşılır olmasına yönelik yapılan bu ve bunun gibi çalışmaların sayılarının artması, iyonküre - reaksiyon dinamiği etkileşimlerine ışık tutmasının yanında bu konudaki literatürün zenginleşmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır

Teşekkür

Yazarlar Kharkov Incoherent Scatter Radar çalışanlarına ve nötr yoğunlukların elde edilmesinde kullanılan NRLMSISE-00 atmosfer modeli için modelleme merkezi yönetimine teşekkür eder.

Yazar katkılarının beyanı

Yazar 1: Fikir oluşturma, deney tasarımı, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, yazım

Yazar 2: Eleştirel inceleme

Kaynaklar

- [1] Yaşar, M. 2021. Investigation of the Solar Eclipse Effect on the Changes of the Loss Terms for 'O⁺ + N₂' Reactive Collision in the Upper Ionosphere, BEU Journal of Science, Cilt. 10 (2), s. 304-310. DOI: 10.17798/bitlisfen.842378
- [2] Altadill, D., et al. 2001. Vertical Structure of a Gravity Wave Like Oscillation in the Ionosphere Generated by the Solar Eclipse of August 11, 1999, Journal of Geophys Res, Cilt. 106(A10), s. 21419-21428. DOI: 10.1029/2001JA900069
- [3] Zerefos, C. S., et al. 2007. Evidence of Gravity Waves into the Atmosphere during the March 2006 Total Solar Eclipse, Atmos Chem Phys, Cilt. 7, s. 4943-4951. DOI: 10.5194/acp-7-4943-2007
- [4] Gerasopoulos, E., et al. 2008. The Total Solar Eclipse of March 2006: Overview, Atmos. Chem. Phys, Cilt. 8, s. 5205-5220. DOI: 10.5194/acp-8-5205-2008
- [5] Manju, G., et al. 2014. Gravity Wave Signatures in the dip Equatorial Ionosphere-Thermosphere System during the Annular Solar Eclipse of 15 January 2010, Journal Geophys. Res, Cilt. 119(6), s. 4929-4937. DOI: 10.1002/2014JA019865
- [6] Gang, C., et al. 2015. Plasma Flux and Gravity Waves in the Midlatitude Ionosphere during the Solar Eclipse of 20 May 2012, Journal Geophys. Res, Cilt. 120(4), s. 3009-3020. DOI: 10.1002/2014JA020849
- [7] Ding, Z., Wu, J., Xu, Z. W., Xu, B., Dai, L. D. 2018. The Qujing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements: Earth, Planets and Spaces, Cilt. 70, s. 87. DOI: 10.1186/s40623-018-0859-8
- [8] Yaşar, M. 2021. Investigation of ionospheric losses for the 'O⁺+O₂→O₂⁺ + O' reaction during the solar eclipse, Physica Scripta, Cilt. 96, 094011. DOI: 10.1088/1402-4896/ac0a2d
- [9] Yaşar, M. 2021. THE SOLAR ECLIPSE EFFECT ON DIFFUSION PROCESSES OF O⁺+O₂→O₂⁺ + O REACTION FOR THE UPPER IONOSPHERE OVER KHARKOV, Thermal Science, Cilt. 25 (1), s. S57-S53. DOI: 10.2298/TSCI200619007Y
- [10] Grigorenko, E.I., Lyashenko, M.V., Chernogor, L.F. 2008. Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere, Geomagnetism and Aeronomy, Cilt. 48 (3), s. 337-351. DOI: 10.1134/S0016793208030092
- [11] <https://www.timeanddate.com/eclipse/map/2006-march-29>
- [12] Gombosi, T. I. 1994. Gas Kinetic Theory. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- [13] <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/NRLMSIS~00/>
- [14] Baumjohann, W., Treumann, R.A. 1997. Basic Space. Imperial College Press, 57 Shelton Street, Covent Garden, London WC2H 9HE



Dielektrik Kaplı İletken Silindirden Saçılan Alanın Minimizasyonu

Minimization of the Scattered Field from the Dielectric Coated Conductive Cylinder

Tanju Yelkenci 

Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Eletronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE
 Sorumlu Yazar / Corresponding Author : tanju.yelkenci@tau.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, TM polarize düzlem dalga ile aydınlatılan, dielektrik malzeme ile kaplı sonsuz uzun, mükemmel iletken, dairesel bir silindirin RKA (radar kesit alanı) 'nı en aza indirmek için analitik yöntemle dayalı bir analiz önerilmektedir. Silindirik yapıdan saçılan alan, farklı bölgelerde Bessel ve Hankel fonksiyonlarının sonsuz seri toplamı cinsinden ifade edilerek analitik olarak belirlenmiştir. Burada temel yaklaşım olarak kalınlık veya permittivite veya frekansın sabit olduğu varsayılarak, iki değişken parametreye bağımlı bir fonksiyonelin parametrik analizi yapılmış ve yapının RKA'nı en aza indirgeyen parametreler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların tutarlılığı, uzak alan ifadeleri gözlemlenerek gösterilmiş ve önerilen yöntemin başarısı çeşitli durumlar için tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaplı silindir, Dielektrik tabaka, Mükemmel iletken, Radar kesit alanı (RKA), TM polarizasyon

Abstract

In this study, an analysis based on the analytical method is proposed to reduce the RCS (radar cross section) of an infinite, perfectly conducting circular cylinder coated with a dielectric material, which is illuminated by a TM polarized plane wave. The scattered field of the cylindrical structure is determined analytically where the fields in different regions are expressed in terms of infinite series summation of cylindrical vector wave functions. Here, as a basic approach, the thickness or permittivity or frequency is assumed to be constant, and parametric analysis of a functional dependent on two variable parameters is performed, consequently, the relevant parameters minimizing the RCS of the structure are determined. The consistency of the obtained results is demonstrated by observing the far-field expressions, and the success of the proposed method is discussed for various situations.

Keywords: Coated cylinder, Dielectric layer, Perfect electric conductor (PEC), Radar cross section (RCS), TM polarization

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Reducing the radar cross-sectional area (RCS) remains actual in applications aimed at minimizing the detectability of targets and is the subject to intensive research studies using different methods. The RCS of a target depends on the geometric and physical structure of the target as well as on the characteristics of the incident wave such as frequency, angle of incidence and polarization. In examining the scattered field of the high frequency electromagnetic waves from targets having complex geometric and physical structures such as aircraft, ships, weapon systems, etc., exact or approximate solutions are frequently obtained using models constructed with basic shapes such as cylinder, sphere, cone, ellipsoid, wedge or their combinations. RCS calculation of basic shapes herewith still continues to hold an important place in many researches.

In this study, an analysis based on the analytical method is proposed to reduce the RCS of an infinite, perfectly conducting circular cylinder coated with a dielectric material, which is illuminated by a TM polarized plane wave at a single frequency. Here, as a basic approach, one of the three parameters such as

frequency, or thickness or permittivity of the coating is assumed to be constant and a functional depending on the other two parameters is defined, consequently, the relevant parameters minimizing the functional and hence the reduced RCS of the structure in this manner are determined.

Materials and Methods

The scattered field from the dielectric coated cylindrical PEC (perfect electric conductor) is determined analytically where the fields in different regions of the structure are represented in terms of infinite series summation of Bessel and Hankel functions. By imposing the appropriate boundary conditions, one gets a set of linear equations involved in incident, transmitted and reflected field coefficients. By solving the system of the resulting linear equations, the scattered field outside the coated cylinder is easily determined. The asymptotic expression of the scattered field is taken into account which appears in the bistatic cylinder RCS equation with far scattered field approximation. In order to reduce the total RCS of the coated cylinder, a functional depending on two variables is defined as a definite integral of the bistatic RCS far field approximation with respect to the observation angle.

Results and Discussion

The numerical results for the minimization procedure are based on the computations of the functional considered for three different scenarios. The image plot of the functional depending on two parameters is depicted while one of the parameters frequency, or thickness or permittivity of the dielectric layer is assumed to be a constant. The points in the yellow colored regions of the image plot represent pairs which correspond to lowest RCS, while darker blue colored regions of the image plot comply with pairs which yield highest RCS. The results that minimize RCS are verified by comparing them graphically with the plots obtained from the bistatic RCS far-zone approximation. It has been observed that the both results are consistent and also in a good agreement.

1. Giriş

Radar kesit alanının (RKA) düşürülmesi, hedeflerin tespit edilebilirliğinin azaltılmasına yönelik uygulamalarda güncelliğini korumakta ve farklı yöntemlerin kullanıldığı yoğun araştırma çalışmalarına konu olmaktadır ([1], [2]). Bir hedefin RKA, hedefin geometrik ve fiziksel yapısına olduğu kadar, gelen dalganın frekans, geliş açısı ve polarizasyon gibi özelliklerine de bağlıdır. Yüksek frekanslı elektromagnetik dalgaların karmaşık geometrik ve fiziksel yapıya sahip, uçak, gemi, silah sistemleri v.b. gibi hedeflerden saçılan alanın incelenmesinde, silindir, küre, koni, elipsoid, kama gibi temel şekiller veya bunların kombinasyonlarıyla oluşturulan modeller yardımıyla elde edilen tam veya yaklaşık çözümlerinden de sıklıkla faydalanılmaktadır. Temel şekillerin RKA'nın hesabı, halen birçok araştırmada önemli bir yer tutmaya devam etmektedir.

RKA tahmini için sayısal yöntemler, yüksek frekanslarda ışın teorisi yöntemleri, ve hibrit yöntemler gibi birçok hesaplama tekniği önerilmiştir ([3], [4]). Yüksek frekanslarda ışın teorisi yöntemleri içinde en dikkate değer olanlar Fizik Optik (FO), Geometrik Optik (GO), Kırınımın Geometrik Teorisi (KGT) ile bu yaklaşımları geliştirmeye yönelik Kırınımın Fizik Teorisi (KFT) ve Kırınımın Üniform Teorisi) adıyla bilinen yöntemlerdir ([5], [6]).

Mükemmel iletken bir yapının, bir veya daha fazla dielektrik tabaka ile kaplanmış olmasının, bu yapıdan saçılan alanın belirli ölçüde kontrol edilmesine olanak sağladığı yapılan klasik araştırmalarda gösterilmiştir. Örneğin, dielektrik kaplı mükemmel iletken silindirden saçılma probleminin ele alındığı çalışmalar, uzun yıllar öncesinden beri yapılmaktadır ([7], 1955), ([8], 1956), ([9], 1957), ([10], 1987)]. İlerleyen yıllarda, dielektrik kaplı, ince mükemmel iletken yapıdan saçılmayı en aza indirmeyi amaçlayan incelemelere de rastlanmaktadır ([11], [12]). Birkaç on yıldan beri, metalmalzemeler gibi doğada bulunmayan yapay malzemelerin kendine özgü elektromanyetik özellikleri kullanılarak, kapsamlı araştırmalar yoğun bir şekilde yürütülmektedir ([13], [14]). Metalmalzeme ve dielektrik kaplı mükemmel iletken silindirik yapılardan saçılmaların karşılaştırması üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır ([15]).

Bu makalede, TM polarize düzlem dalga ile aydınlatılan dielektrik kaplamalı, dairesel kesitli, mükemmel iletken, sonsuz uzun silindirin RKA'nı, en aza indirmeyi amaçlayan bir çalışma sunulmuştur. Burada, [16] da belirtilmiş olan, frekansın sabit, kalınlık ve permitivitinin değişken varsayıldığı senaryonun kapsamı genişletilerek; frekans, dielektrik tabakanın kalınlık ve

Conclusion

The first results obtained in this study, which brings simple options to classical RCS reduction techniques, have demonstrated that according to the applied method, RCS can significantly be reduced by covering a conductive cylindrical structure with appropriate thickness and dielectric materials at a single frequency. In this context, it is anticipated that the proposed approach may have a potential to be used in real physical and practical applications. For example, numerical modeling of aircraft or similar structures and determining the physical and constitutive properties of the coating to be applied on them in a manner similar to the approaches presented here constitute an important practical problem.

permitivitesi gibi parametrelerden biri sabit iken, diğer iki parametreye bağlı bir fonksiyonel tanımlanıp, bu fonksiyoneli, dolayısıyla RKA'nı minimum yapacak bir yöntem önerilmiştir.

Bölüm 2 'de dielektrik kaplı sonsuz uzun mükemmel iletken silindirik yapının geometrisi, TM polarize düzlem dalgayla aydınlatılan yapının farklı bölgelerindeki alanların analitik ifadelerinin formülasyonu ve sınır koşullarının uygulanması sonucu belirlenmiş olan, saçılan alana ilişkin katsayının çözümü verilmiştir.

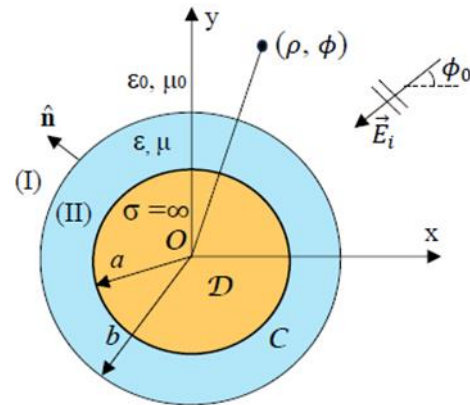
Bölüm 3'de bir önceki bölümde yapılan analiz ile elde edilen saçılan alan katsayısını içeren uzak alan RKA yaklaşımı ifadesini minimum yapacak parametrelerin belirlenmesinde kullanılacak fonksiyonellerin formülasyonları belirlenmiştir.

Bölüm 4'te yapının RKA'nı en aza indirgeyen sayısal bulgular verilmiş ve bunların uzak alan yaklaşımı sonuçlarıyla karşılaştırılarak sağlanması yapılmıştır.

Son olarak Bölüm 5'te, önerilen yöntem ve bulgular yorumlanmıştır. Bu çalışmada, zamanla değişim çarpanı $e^{-i\omega t}$ olarak düşünülmüştür.

2. Problemin Geometrisi ve Formülasyonu

Şekil 1'deki yapıyı ele alalım:



Şekil 1. Dielektrik malzeme kaplı, sonsuz uzun mükemmel iletken silindirik cisim.

Figure 1. Dielectric material coated, infinitely long, perfectly conductive cylindrical body.

Bu yapıda, \mathcal{D} , ortam parametreleri ϵ_0 ve μ_0 olan boş uzaydaki sonsuz uzun, a yarıçaplı, dairesel silindir şeklinde mükemmel iletken bir cisimdir. Mükemmel iletken cisim, C ile gösterilen,

kalınlığı t , bünye parametreleri ε ve μ olan, dielektrik bir malzeme ile kaplanmıştır. Dielektrik malzeme ile kaplanmış olan mükemmel iletken cisim, TM polarize bir düzlem dalga ile aydınlatılmıştır. Cisim sonsuz uzun ve z-eksenine paralel olduğundan, toplam elektrik alan vektörü z-eksenine paralel olur. Gelen elektrik alanın silindirik koordinatlardaki ifadesi

$$\vec{E}^i = u^i(\rho, \phi) \vec{e}_z^-, \quad \phi \in (0, 2\pi) \quad (1)$$

şeklindedir. Bu ifadede geçen

$$u^i(\rho, \phi) = e^{-ik_0\rho \cos(\phi-\phi_0)} \quad (2)$$

olup, $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ boş uzayın dalga sayısını, ϕ_0 ise gelen dalganın geliş açısını göstermektedir.

Uzayın farklı ($\rho > b$ ve $a < \rho < b$) bölgelerindeki alanların sonsuz seri açılımları, sırasıyla,

$$u^I(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[i^{(-n)} e^{-in\phi_0} J_n(k_0\rho) + A_n H_n^{(1)}(k_0\rho) \right] e^{in\phi}, \quad \rho > b \quad (3)$$

ve

$$u^{II}(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[B_n J_n(k_0\rho) + C_n H_n^{(1)}(k_0\rho) \right] e^{in\phi}, \quad a < \rho < b \quad (4)$$

olarak verilir. Burada, J_n n'yinci mertebe Bessel fonksiyonunu, $H_n^{(1)}$ ise birinci türden n'yinci mertebe Hankel fonksiyonunu göstermektedir ([17]). Yukarıdaki ifadelerde gözükten $A_n, B_n,$ ve C_n katsayıları

$$u^{II}(\rho, \phi) = 0, \quad \rho = a \quad (5)$$

$$u^{II}(\rho, \phi) = u^I(\rho, \phi), \quad \rho = b \quad (6)$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial u^{II}(\rho, \phi)}{\partial \rho} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial u^I(\rho, \phi)}{\partial \rho}, \quad \rho = b \quad (7)$$

sınır koşulları dikkate alınarak belirlenecek olan bilinmeyen katsayılarıdır. Bu tür silindirik yapılara ilişkin analitik çözümlerin ifadeleri ([18]) de verilmiştir. Buna göre (3) ve (4) de verilen ifadeler (5), (6) ve (7) nolu denklemlerde yerine konularak ve $e^{in\phi}$ fonksiyonlarının ortogonalite özellikleri de dikkate alınarak 3 bilinmeyenli 3 denklemden A_n katsayısı

$$A_n = \frac{i^{(-n)} e^{-in\phi_0} [\mu_r M J_n'(k_0 b) - N J_n(kb)]}{N H_n^{(1)}(k_0 b) - \mu_r M H_n^{(1)'}(k_0 b)} \quad (8)$$

yazılabilir. Bu ifadede gözükten M ve N

$$M = J_n(kb) H_n^{(1)}(ka) - J_n(ka) H_n^{(1)}(kb), \quad (9)$$

ve

$$N = J_n'(kb) H_n^{(1)}(ka) - J_n(ka) H_n^{(1)'}(kb) \quad (10)$$

şeklindedir. Dielektrik kaplı cismin dışında kalan bölgede saçılan alan ifadesi ise (3) no lu denklemin sağ tarafındaki serinin içindeki ikinci parça

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(k_0\rho) e^{in\phi}$$

kullanılarak aşağıdaki gibi

$$u^S(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(k_0\rho) e^{in\phi}, \quad \rho > b, \quad (11)$$

yazılabilir. Sonraki bölümde, (11) denkleminin asimptotik ifadesi dikkate alınarak dielektrik malzemeye kaplı silindirik yapının RKA'nın sırasıyla $(\varepsilon, t), (f, t)$ ve (f, ε) parametre çiftlerine göre minimizasyonu ele alınacaktır. Bu kapsamda (11) ile verilen ifadede Hankel fonksiyonunun büyük argümanlar halindeki asimptotik ifadesi yerine yazılırsa, uzak alan ifadesi $k_0\rho \rightarrow \infty$ için

$$u^S(\rho, \phi) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi k_0}} e^{i(k_0\rho - \pi/4)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{in\phi} \quad (12)$$

şeklinde elde edilir ([17]).

3. RKA'nın Minimizasyonu

İki boyutlu bir hedefin RKA ile temsil edilen σ elektromanyetik saçılımı, genellikle,

$$\sigma_{2-D} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho \frac{|u^S|^2}{|u^I|^2} \quad (13)$$

şeklinde tanımlanmaktadır ([17]). Sabit bir frekans için, TM polarize gelen dalga durumunda, uzak alan yaklaşımı ile silindire ait bistatik RKA

$$\sigma(\phi) = \frac{2\lambda_0}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(\varepsilon, t) e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2 \quad (14)$$

ile verilmektedir ([15]). Burada A_n , yukarıda da sözünü ettiğimiz üzere gözönüne alınan yapıya ilişkin saçılma katsayısı olup, kaplamanın dielektrik parametresine ve kalınlığına bağlıdır. Dielektrik kaplı silindirin toplam RKA'nı minimize etmek amacıyla, ϕ gözlem açısına göre $\sigma(\phi)$ fonksiyonunun integralinden ibaret aşağıda belirtilen gibi bir fonksiyonel tanımlanabilir:

$$F(\varepsilon, t) = \int_0^{2\pi} \sigma(\phi) d\phi = 4\lambda_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} |A_n(\varepsilon, t)|^2 \quad (15)$$

Bu fonksiyonel elde edilirken, (14) deki serinin açık halinin eşleniği ile çarpımı olduğu göz önünde bulundurulmuştur. ε ve t 'nin belirli aralıklarda değişimleri dikkate alınarak, $F(\varepsilon, t)$ fonksiyonelinin dielektrik parametresi ve kalınlığa göre 2-boyutlu grafiği kolayca elde edilebilir. Grafikten elde edilecek olan $F(\varepsilon, t)$ fonksiyonelinini minimize eden (ε, t) çiftleri, problemin aranan çözümü olacaktır.

Benzer düşüncelerle, kaplamanın dielektrik parametresinin sabit bir değeri için, bistatik RKA

$$\sigma(\phi) = \frac{2\lambda_0}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(f, t) e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2, \quad (16)$$

fonksiyonel ise

$$F(f, t) = \int_0^{2\pi} \sigma(\phi) d\phi = 4\lambda_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} |A_n(f, t)|^2 \quad (17)$$

olarak tanımlanabilir. $F(f, t)$ fonksiyonelinin, f ve t 'nin belirli aralıklarda değişimiyle elde edilecek grafiğinden hareketle, $F(f, t)$ fonksiyonelinin minimize eden (f, t) çiftleri kolayca elde edilir.

Yine benzer şekilde, dielektrik kaplamanın kalınlığının sabit bir değeri için, bistatik RKA

$$\sigma(\phi) = \frac{2\lambda_0}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(f, \varepsilon) e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2, \quad (18)$$

fonksiyonel ise

$$F(f, \varepsilon) = \int_0^{2\pi} \sigma(\phi) d\phi = 4\lambda_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} |A_n(f, \varepsilon)|^2 \quad (19)$$

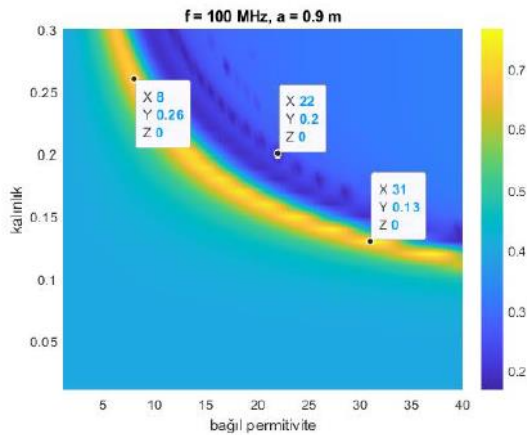
şeklinde düşünülebilir. $F(f, \varepsilon)$ fonksiyonelinin, f ve ε 'nu belirli aralıklarda değiştirmek suretiyle elde edilecek grafiğinden, $F(f, \varepsilon)$ fonksiyonelinin minimize eden (f, ε) çiftleri kolayca bulunur.

Bundan sonraki kısımda sayısal bulgulara yer verilecektir.

4. Sayısal Bulgular

Sayısal sonuçlar, önceki bölümde tartışılan, dielektrik malzemeyle kaplı, bir mükemmel iletken dairesel silindir için analitik formülasyonu yapılan fonksiyonellerin hesabına dayanmaktadır. Aşağıdaki örneklerin tümünde TM polarize düzlem dalganın geliş açısı $\phi_0 = 0^\circ$, mükemmel iletken dairesel silindirin yarıçapı $a=0,9$ m ve tabakanın bağli permeabilitesi $\mu_r = 1$ 'dir.

İlk örnekte, frekans $f=100$ MHz olarak seçilmiştir. Dielektrik kaplamanın kalınlığı 0,01 ila 0,3 m, bağli permitivitesi ise 1 ila 40 arasında değişmektedir. (15) nolu denklem uyarınca $F(\varepsilon, t)$ 'nin grafiği Şekil 2'de gösterilmektedir.

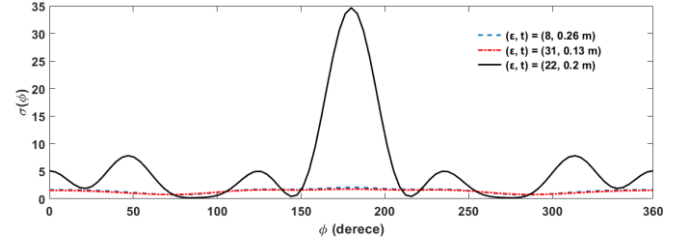


Şekil 2. $f = 100$ MHz için $F(\varepsilon, t)$ fonksiyonelinin grafiği.

Figure 2. Image plot of the functional $F(\varepsilon, t)$ at $f = 100$ MHz.

Grafiğinin sarı renkli bölgelerindeki noktalar, en düşük RKA'na karşılık gelen kalınlık ve bağli geçirgenlik çiftlerini temsil ederken, grafiğin koyu mavi renkli bölgeleri, en yüksek RKA'ni veren (ε, t) çiftlerine karşı gelmektedir.

Şekil 2' den görülebileceği gibi, sarı renkli bölgeden (8,0.26 m), (31,0.13 m) ve koyu mavi renkli bölgeden (22,0.2 m) değerlerine sahip üç (ε, t) çifti seçilmiştir. Seçilen bu değerlere göre, $\sigma(\phi)$ 'nin ϕ ile değişimi, Şekil 3' de verilmiştir:

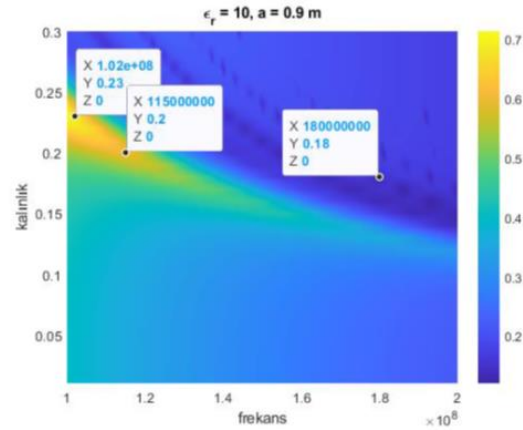


Şekil 3. $f = 100$ MHz, $a = 0.9$ m için RKA'nın ϕ gözlem açısıyla değişimi.

Figure 3. Variation of RCS with observation angle ϕ for $f = 100$ MHz, $a = 0.9$ m.

$F(\varepsilon, t)$ fonksiyonelinin en aza indiren (ε, t) , yani (8,0.26 m), (31,0.13 m) değerlerinin beklendiği gibi birbirine yakın olduğu ve bunların dışındaki (22,0.2 m) çiftinin ürettiği değerlerin çok farklı olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir.

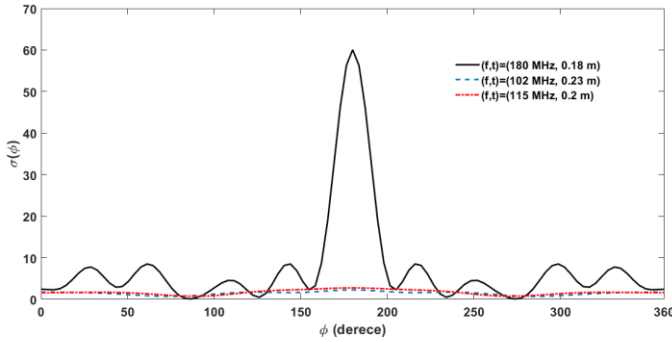
İkinci örnekte, dielektrik katmanın bağli permitivitesi $\varepsilon_r = 10$ seçilmiştir. Frekans değişim aralığı 1 ile 2 MHz arasında olup, dielektrik kaplamanın kalınlığı 0,01 ile 0,3 m arasında değişmektedir. (17) uyarınca, $F(f, t)$ fonksiyonelinin grafiği Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. $\varepsilon_r = 10$ için $F(f, t)$ fonksiyonelinin grafiği.

Figure 4. Image plot of the functional $F(f, t)$ for $\varepsilon_r = 10$.

Şekil 4' den görülebileceği üzere, sarı renkli bölgeden (102 MHz, 0.23 m), (115 MHz, 0.2 m) ve koyu mavi renkli bölgeden (180 MHz, 0.18) değerlerine sahip üç (f, t) çifti seçilmiştir. Seçilen bu değerlere göre, $\sigma(\phi)$ 'nin ϕ ile değişimi, Şekil 5' de verilmiştir:

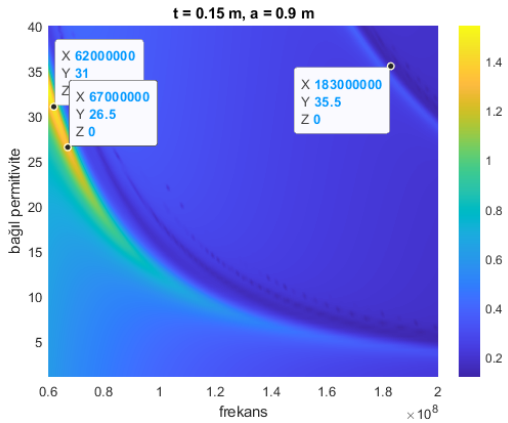


Şekil 5. $\epsilon_r = 10$, $a = 0.9$ m için RKA'nın ϕ gözlem açısıyla değişimi.

Figure 5. Variation of RCS with observation angle ϕ for $\epsilon_r = 10$, $a = 0.9$ m.

$F(f, t)$ fonksiyoneli en aza indiren (f, t) , yani sarı bölgeden (102 MHz, 0.23 m), (115 MHz, 0.2 m) değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bunların dışındaki koyu mavi bölgeden (180 MHz, 0.18) çiftinin çok bariz bir şekilde farklı olduğu açıkça görülmektedir.

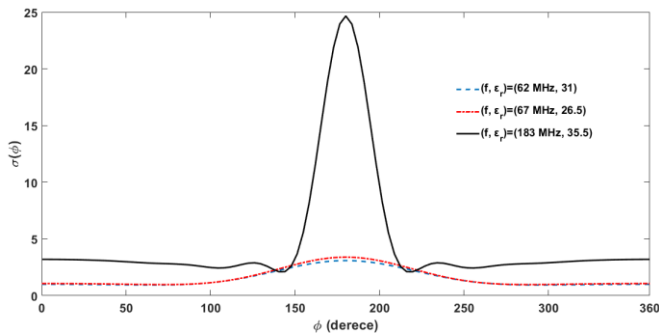
Son örnekte, dielektrik katmanın kalınlığı $t = 0.15$ m seçilmiştir. Frekans 70 ile 100 MHz, bağıl permitivite ise 1 ile 40 arasında değişmektedir. (19) uyarınca, $F(f, \epsilon)$ fonksiyonelinin grafiği Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. $t = 0.15$ m için $F(f, \epsilon)$ fonksiyonelinin grafiği.

Figure 6. Image plot of the functional $F(f, \epsilon)$ for $t = 0.15$ m.

Şekil 6' da verildiği üzere, sarı renkli bölgeden (62 MHz, 31), (67 MHz, 26.5) ve koyu mavi renkli bölgeden (183 MHz, 35.5) değerlerine sahip üç (f, ϵ) çifti seçilmiştir. Seçilen bu değerlere göre, $\sigma(\phi)$ 'nin ϕ ile değişimi, Şekil 7' de görülmektedir:



Şekil 7. $t=0.15$ m, $a=0.9$ m için RKA'nın ϕ gözlem açısıyla değişimi.

Figure 7. Variation of RCS with observation angle ϕ for $t=0.15$ m, $a=0.9$ m.

$F(f, \epsilon)$ fonksiyoneli en aza indiren (f, ϵ) , yani sarı bölgeden (62 MHz, 31), (67 MHz, 26.5) değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bunların dışındaki koyu mavi bölgeden (183 MHz, 35.5) çiftinin farklı olduğu grafikte açıkça belirgindir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, dielektrik malzeme kaplamalı, TM polarize düzlem dalga ile aydınlatılan sonsuz uzun mükemmel iletken silindirin RKA'nın azaltılması için analitik yaklaşıma dayalı bir analiz önerilmiştir. Bu amaçla, ilkönce sabit frekans halinde kaplama malzemesinin bağıl geçirgenlik ve kalınlık parametrelerine göre, sonra sabit bağıl geçirgenlik halinde frekans ve kalınlık parametrelerine göre ve son olarak sabit kalınlık halinde frekans ve bağıl geçirgenlik parametrelerine göre fonksiyoneller tanımlanmıştır. Tanımlanan her bir fonksiyonelin parametrelerinin değişim aralıklarına göre hesaplanan 2-boyutlu grafiğinden, saçılan alanı, dolayısıyla RKA'nını minimize eden parametre çiftleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bistatik RKA uzak bölge yaklaşım ifadesinin sonuçlarıyla grafik olarak karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Klasik RKA düşürme tekniklerine basit seçenekler getiren bu çalışmada elde edilen ilk sonuçlar, uygulanan yöntemin iletken bir silindirik yapıyı uygun kalınlık ve dielektrik malzemelerle kaplayarak RKA'nın ciddi oranlarda düşürülebileceğini göstermiştir. Bu kapsamda önerilen yaklaşımın gerçek fiziksel ve pratik uygulamalarda da kullanılabilme potansiyelinin olabileceği öngörülmektedir. Örneğin, uçak ya da benzeri yapıların sayısal olarak modellenmesi ve üzerine yapılacak kaplamanın burada sunulan yaklaşımlara benzer şekilde belirlenmesi pratik açıdan önemli bir problem oluşturur.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Knott, E. F., Schaeffer, J. F., Tuley, M. T. 2004. Radar Cross Section. 2nd Ed., SciTech Publishing, Raleigh, NC, 637s.
- [2] Skolnik, M.I. 2001. Radar Handbook, 3rd Ed., Mc-Graw-Hill Publishing Company, 772s.
- [3] Knott, E. F. 1985. A progression of high-frequency RCS prediction techniques. Proceedings of IEEE, Cilt. 73, no. 2, s. 252-264. DOI: 10.1109/proc.1985.13137
- [4] Jenn, D. C. 2005. Radar and Laser Cross Section Engineering. AIAA Press, USA, 503s.
- [5] James, G. L. 2007. Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves. Reprint of 3rd Ed., IET Electromagnetic Waves Series 1, London, United Kingdom, 293s.
- [6] Leader, C. J. 1982. Modern Methods of Scattering Predictions. SPIE Proceedings, Applications of Mathematics in Modern Optics, SPIE 26th Annual Technical Symposium - San Diego, August. Cilt. 358, s. 17-23. DOI: 10.1117/12.934050
- [7] Elliott, R. S. 1955. Azimuthal surface waves on circular cylinders, J. Appl. Phys., Cilt. 26, no. 4, s. 368-376. DOI: doi.org/10.1063/1.1722000
- [8] Wu, T.T. 1956. High frequency scattering. The Physical Review, Cilt. 104, no. 5, s. 1201-1212. DOI: 10.1103/PhysRev.104.1201
- [9] Tang, C. C. 1957. Back-scattering from dielectric coated infinite cylindrical obstacles. J. Appl. Phys., Cilt. 28, no. 5, s. 628-633. DOI:10.1063/1.1722815
- [10] Kim, H., Wang, N. 1987. High Frequency Analysis of EM Scattering from a Circular Conducting Cylinder with Dielectric/Ferrite Coating. The Ohio State University, ElectroScience Laboratory, Technical Report No. 717674-4, 174s.

- [11] C. A. Valagiannopoulos, Alitalo, P. and Tretyakov, S. 2012. Dielectric-coated PEC Cylinders which do not Scatter Electromagnetic Waves. IEEE Conference Paper, September, s. 90-91.
DOI: 10.1109/ICEAA.2012.6328595
- [12] C. A. Valagiannopoulos, Alitalo, P. and Tretyakov, S.A. 2014. On the Minimal Scattering Response of PEC Cylinders in a Dielectric Cloak. IEEE Ant. and Wireless Prop. Letters, Cilt. 13, s. 403-416.
DOI: 10.1109/LAWP.2014.2307015
- [13] Engheta, N., and Ziolkowski, R. W. 2006. Metamaterials. Physics and Engineering Explorations, Wiley-IEEE Pres, New Jersey, s. 414.
- [14] Ahmed, S. and Naqvi, Q. A. 2009. Scattering of electromagnetic waves from a nihility circular cylinder coated with a metamaterial. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Cilt. 30, s. 1044–1052.
DOI 10.1007/s10762-009-9531-5
- [15] C. Li, Shen, Z. 2003. Electromagnetic scattering by a conducting cylinder coated with metamaterials. Progress in Electromagnetics Research, Cilt. 42, s. 91-105.
DOI:10.2528/PIER03012901
- [16] Yelkenci, T. 2023. 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), IEEE. Determination of the Dielectric Coating Parameters to Reduce the Radar Cross-section of the Perfectly Conducting Cylinder. s. 1-3
DOI: 10.1109/ELECO60389.2023
- [17] Gradshteyn, I., Ryzhik, I. 2007. 7th Ed. "Table of Integrals, Series and Products", Academic Press & Elsevier Inc., 1171s.
- [18] Balanis, C.A. 2012. 2nd Ed. "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, Inc., 1046s.



ARAŞTIRMA MAKALLESİ / RESEARCH ARTICLE

Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi

Energy and Exergy Analysis of A Photovoltaic Solar Power Plant

Selçuk Özel ¹, Ünal Çamdalı ^{2*}

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: unalcamdali@gmail.com

Öz

Ekserji analizi, enerji kalitesinin ve tersinmezliklere bağlı olarak bir sistemde oluşan kayıpların belirlenmesi noktasında önemlidir. Ekserji iş üretebilme kabiliyetidir. Başlangıç halinden ölü hale ulaşmaya kadar, sistemden elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iş olarak tanımlanabilir. Enerjiyi dönüştüren tüm sistemler için ekserji analizi gerçekleştirmek mümkündür. Zira ekserji miktarla beraber niteliğin de bir ölçüsüdür. Fotovoltaik sistemlerde güneş paneli tarafından üretilen (dönüştürülen) elektrik, sistemin ürettiği ekserji değerini vermektedir. Elektrik üretimi sırasında ısı da oluşmaktadır. Oluşan ısı, tersinmezliklerden kaynaklı olarak ekserji kayıplarını oluşturmaktadır. Bu çalışmada pik gücü 1,21 MW olan ve Kayseri’de kurulan fotovoltaik güneş santralinin gerçek üretim değerleri kullanılarak güneş enerjisinin yoğun olduğu, Haziran-Ağustos dönemlerindeki (2017 yılı), enerji ve ekserji verimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Değerler aylık olarak 5’er günlük test günlerindeki 08:00-20:00 zaman diliminde elde edilmiştir. Elde edilen gerçek değerler: tesisin ürettiği elektrik (gücü), güneş ışınımı ve ortalama çevre sıcaklığıdır. Sonrasında bunlara bağlı olarak tesisin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Enerji verimi Haziran ve Temmuz aylarında %25’in üzerine olduğu halde aynı aylardaki ekserji verim değerleri en yüksek % 27,7 ve % 28,7, Ağustos ayında ise en yüksek % 25,7 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla fotovoltaik sistemlerdeki tersinmezliklerden dolayı oluşan kayıpların, ekserji veriminin en yüksek olduğu sabah saatlerinde bile % 70’ in üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, fotovoltaik sistemler, enerji analizi, ekserji analizi

Abstract

Exergy analysis is important in determining the quality of energy and losses in a system based on irreversibility. Exergy is the ability to produce work. It can be defined as the maximum theoretical useful work that can be obtained from the system between the initial state and the dead state. It is possible to perform exergy analysis for all energy conversion systems because it is a measure of quality as well as quantity. In photovoltaic systems, the electricity produced (converted) by the solar panel gives the exergy value produced by the system. Heat is also generated during electricity production. The heat generated creates exergy losses due to irreversibility. In this study, the energy and exergy efficiencies of the photovoltaic solar power plant located in Kayseri, Türkiye with a peak power of 1.21 MW, were tried to be determined by using the actual production values in the June-August periods (in 2017), when solar energy is intense. Values were obtained monthly between 08:00 AM-20:00 PM on a five-day test. The actual production values obtained are: the electrical power produced by the facility, solar radiation and average environment temperature. Afterwards, energy and exergy analysis of the facility was performed based on the obtained values. Although the energy efficiency was above 25% in June and July, the highest exergy efficiency values in the same months were 27.7% and 28.7% respectively, and the highest was 25.7% in August. Therefore, it has been determined that losses due to irreversibility in photovoltaic systems are over 70% even in the morning hours when exergy efficiency is highest.

Keywords: Solar energy, photovoltaic systems, energy analysis, exergy analysis

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Limited fossil resources and developing environmental awareness are important factors for the widespread use of renewable energy resources for sustainable development. Solar energy, considering its potential and suitability based on location and climate zone, emerges as one of the leading renewable resources. Despite the increase in the number of installed solar power plants in recent years, solar energy remains underutilized. As of the end of October 2023, Turkey’s electrical power capacity stands at approximately 107,000 MW. Breaking down the sources of installed power, 29.8% is hydraulic energy, 23.9% is

natural gas, 20.6% is coal, 11% is wind, approximately 10.5% (or 11 thousand MW) is solar, 1.6% is geothermal, and 2.6% is from other sources. Furthermore, the number of electric power generation plants increased to 12,868 (including unlicensed power plants) by the end of October 2023. Among these, 754 units are hydroelectric, 68 units are coal, 363 units are wind, 63 units are geothermal, 344 units are natural gas, 10,784 units are solar, and 492 units are from other power sources [1].

Türkiye has sufficient potential in terms of solar energy. During the June-August period, the monthly average sunshine duration is over ten hours. In the same period, the monthly average values

of solar radiation are 5.8–6.57 kWh/m²day. Determining how much of this solar radiation coming to the unit surface area can be converted into useful work is important in terms of designing photovoltaic solar energy systems and making cost analysis more precisely. In this respect, exergy analyzes must be performed along with energy analyzes in photovoltaic systems.

Materials and Methods

Energy Analysis

By using the first law of thermodynamics, the general form of the energy balance equation for a system can be written as:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{ex} + \left(\frac{\Delta E}{\Delta t}\right)_{sys} \quad (1)$$

Energy efficiency in photovoltaic panels refers to the ratio of the electricity produced by the solar panel to the sunlight falling on the solar panel. The efficiency of the panels can be defined by the equation given below.

$$\eta_e = \frac{P_e}{A.G} \quad (1a)$$

The power obtained from the panel and the performance of solar panels are related to environmental factors such as ambient temperature, panel temperature and dust. Ndiaye et al. [3], in their study, showed the effect of dust on the panel on the performance of the panel. Joshi et al. [18] stated that the energy efficiency of the solar panel is as in Eq. (2).

$$\eta_e = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{A.G} \quad (2)$$

In Eq. (3), the product of the current and voltage values produced by the solar panel under an electrical load gives the amount of electricity produced. The power value obtained from the solar panel at the maximum level is expressed by the equation given in Eq. (4).

$$P_e = VI \quad (3)$$

$$P_{max} = V_{OC} I_{SC} FF = V_{mp} I_{mp} \quad (4)$$

Exergy Analysis

Exergy is work or the ability to produce work. Exergy is a measure of quality as well as quantity. It is defined as the maximum theoretical useful work that can be obtained from the system between the initial state and the dead state [6,7]. This value shows the useful work potential or opportunity to do work and is called availability (exergy). While energy can always be conserved in a process, exergy is consumed due to irreversibility in real processes, except for reversible processes. Irreversibility is the work potential lost during a process. Exergy consumption during a process is proportional to the entropy generated due to irreversibilities associated with the process.

The exergy equation of the solar panel is expressed as in Equation (5).

$$\dot{E}_{XG} = \dot{E}_{XC} + \dot{E}_{XI} + \dot{E}_{XK} \quad (5)$$

Experimental Study

The energy and exergy efficiencies of the solar power plant with an installed capacity of 1.21 MW, established in Kayseri, Türkiye were examined. A total of 4692 solar panels, each with a power of 260 W, were used in the power plant. Additionally, 17 inverters were used, each providing 60 W electrical output. In the study, ambient temperature, solar radiation value and the amount of electricity produced by the solar panels in the power plant were measured. Ambient temperature and solar radiation value were measured by a meteorological station. Since the solar panels in the power plant are arranged with a 25° placement angle, the irradiance matter is also positioned with a 25° placement angle. The amount of electrical energy generated by the solar panels and entering the inverters was obtained through the electronic interface in the inverters (Fig. 1). The wind speed is taken as 1 m/sec, which is the nominal operating condition stipulated by the manufacturers. The module temperature was found via Eq. (15). The surface area used in the calculations was found by multiplying the total number of solar panels by the area of the solar panel. The coefficients used in the calculations are stated in Table 1. Clear weather days were designated as test days. In addition, in determining the test days, care was taken to ensure that the solar panels were dust-free and clean. 15 days of performance data in total, 5 days each month, were used in the 3-month period between June and August in 2017.

Results and Discussion

Fig. 2 illustrates the variation in module temperature, energy, and exergy efficiency. As the ambient temperature rises, the module temperature increases accordingly. This elevation in module temperature results in a decrease in both exergy and energy efficiency. Comparable trends are observable in July and August as depicted in Figures 3 and 4. The peak exergy efficiencies were recorded at 27.7% and 28.7% in June and July, respectively. Energy efficiency likewise surpassed 25% during these months. The average highest ambient temperature in June is 31.7 °C.

Conclusion

The results obtained from the study indicate that the exergy and energy efficiency of photovoltaic solar panels are low. The most significant exergy loss occurs due to irreversibility during the electricity production of the solar panel. As the module temperature increases, irreversibility also increases. Consequently, the morning hours exhibit the highest exergy efficiency, as ambient and module temperatures are lower during this time compared to other hours of the day. Further research is needed to enhance solar panel efficiency and operational conditions. Additionally, the solar radiation value is a crucial factor that enhances exergy efficiency.

1. Giriş

Fosil kaynakların sınırlı olması ile birlikte son yıllarda gelişen çevre bilinci, sürdürülebilir bir kalkınma için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşmasını elzem hale getirmiştir. Ülkemizin konumu ve iklim kuşağı göz önüne alındığında, sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli, yenilenebilir kaynakları açısından önem ifade etmektedir. Son yıllarda kurulu

güneş enerjisi santrallerinin sayılarının artmasına rağmen güneş enerjisinden yeteri kadar faydalanılmadığı da bir gerçektir.

2023 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla ülkemizin elektrik kurulu gücü, yaklaşık 107.000 MW'dır. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılım ise %29,8'i hidrolik enerji, %23,9'u doğal gaz, %20,6'sı kömür, %11'i rüzgâr, %10,5'i (yaklaşık 11 bin MW) güneş, %1,6'sı jeotermal ve %2,6'sı diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca ülkemizdeki elektrik üretim santrallerinin sayısı, 2023 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla 12.868'e (lisanssız santraller dâhil)

yükselmiştir. Mevcut santrallerin 754 adedi hidroelektrik, 68 adedi kömür, 363 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 344 adedi doğal gaz, 10.784 adedi güneş, 492 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir. Yukarıda da ifade edildiği gibi Türkiye güneş enerjisi bakımından yeterli potansiyele sahiptir. Haziran-Ağustos döneminde, aylık ortalama güneşlenme süreleri on saatin üzerindedir. Yine aynı dönemde güneş ışınımı aylık ortalama değerleri 5,8–6,7 kWh/m²gün'dür [1].

Birim yüzey alana gelen güneş radyasyonunun ne kadarının faydalı işe dönüştürülebileceğinin tespiti, fotovoltaik güneş enerjili sistemlerin tasarlanması ve maliyet analizlerinin daha sağlıklı yapılabilmesi açısından önemlidir. Bu açıdan fotovoltaik sistemlerde enerji analizleriyle beraber ekserji analizlerinin de yapılması faydalı olacaktır.

Enerji analizinde, sistemdeki kurulu güneş paneli üzerine düşen ışınım miktarı ile sistemin ürettiği enerji miktarı karşılaştırılır. Enerji analizi, termodinamiğin birinci yasasına göre yapılmaktadır. Enerji analizinde; sisteme giren enerji, sistemden çıkan enerji ile sistemin enerji değişim miktarı, göz önünde bulundurulur.

Ekserji bir sistemin referans çevre ile denge durumuna geldiğinde, üretebileceği maksimum teorik yararlı iş miktarıdır [2]. Tersinmez işlemlerde belli miktardaki entropi artışıyla birlikte iş kaybı oluşmasına karşın, en fazla iş sadece tersinir süreçlerde elde edilir. Ekserji tersinir süreçler dışında, enerji gibi korunan bir büyüklük değildir. Bu yüzden termodinamiğin birinci (enerjinin korunumu) yasasına göre değil ikinci yasasına göre açıklanmaktadır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Enerji Analizi

Termodinamiğin birinci yasasına göre bir sistemin enerji dengesi, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{E}_g = \dot{E}_c + \left(\frac{\Delta E}{\Delta t}\right)_{sis} \quad (1)$$

Fotovoltaik sistemlerde enerji verimi; Eşitlik (1a)'da verildiği gibi güneş paneli tarafından üretilen elektriğin (güç olarak), üzerine düşen güneş ışınımına oranı olarak tanımlanabilir.

$$\eta_e = \frac{P_e}{A.G} \quad (1a)$$

Elde edilen güç ve panellerinin performansı; çevre (ortam) sıcaklığı, panel sıcaklığı, toz gibi çevresel etmenlerle ilişkilidir. Ndiaye ve arkadaşları, panel üzerindeki tozun, panelin performansına olan etkisini göstermiştir [3]. Şahin ve diğerleri ise güneş panelinin enerji verimini, Eşitlik (2)'deki gibi belirtmiştir [4].

$$\eta_e = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{A.G} \quad (2)$$

Eşitlik (3)'te görüldüğü gibi üretilen elektriksel güç, güneş paneli tarafından üretilen akım ve gerilim değerinin çarpımı olarak verilir. Güneş panelinden maksimum seviyede elde edilen güç ise Eşitlik (4)'te verilen bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$P_e = VI \quad (3)$$

$$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF = V_{mp} I_{mp} \quad (4)$$

2.2. Ekserji Analizi

Ekserji iş üretebilme kabiliyetidir. Ekserji, miktarla beraber niteliğin de ölçüsüdür. Yukarıda da ifade edildiği gibi başlangıç halinden ölü hale ulaşıncaya kadar sistemden elde edilebilecek en fazla teorik yararlı iş olarak tanımlanmaktadır [5, 6]. Bu değer

yararlı iş potansiyelini veya iş yapma kabiliyetini göstermekte ve enerjinin kullanılabilirliği olarak da tanımlanmaktadır.

Enerji bir süreçte korunurken, ekserji tersinir süreçlerin dışında, gerçek süreçlerde tersinmezlikler nedeni ile tüketilmekte veya yok edilmektedir. Tersinmezlik, bir süreç sırasında kaybedilen iş potansiyelidir. Bir süreç boyunca ekserji tüketimi, süreçle ilişkili tersinmezlikler nedeni ile ortaya çıkan (üretilen) entropi ile orantılıdır. Enerjinin kalitesindeki (kullanılabilirliğindeki) azalma, ekserji kaybı olarak ifade edilebilir.

Güneş panelinin ekserji dengesi, Eşitlik (5)'teki gibi verilebilir [7,8].

$$\dot{E}_{XG} = \dot{E}_{XC} + \dot{E}_{XI} + \dot{E}_{XK} \quad (5)$$

Güneş panelleri emilen güneş ışınımını, elektrik ve ısıya dönüştürür. Güneş panelleri tarafından üretilen (dönüştürülen) elektrik ise kullanılabilir enerjidir ve sistemin ekserjisi olarak kabul edilebilir [9]. Ancak oluşan ısı genellikle kullanılamamakta ve çevreye transfer edilmektedir. Çevreye transfer edilen ısının bir kısmı, sistem için ekserji kaybı olarak ifade edilebilir [10].

Güneş paneli için ekserji verimi, güneş panelinden elde edilen ekserjinin, güneş ışınımının sahip olduğu ekserjiye oranı şeklinde tanımlanabilir [11].

$$\eta_{EX} = \frac{\dot{E}_{Xe}}{\dot{E}_{XG}} \quad (6)$$

Fotovoltaik güneş enerjisi sistemlerinde, sisteme giren ekserji, güneş ışınımının sahip olduğu ekserji değeridir. Bu değer aşağıdaki eşitlik ile verilir [11,12].

$$\dot{E}_{XG} = A.G \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4 \right] \quad (7)$$

Fotovoltaik sistem için sistemde elde edilen ekserji ise üretilen elektriksel değere (güce) eşittir [9].

$$\dot{E}_{Xe} = \dot{E}_{XC} \quad (8)$$

Yukarıda da ifade edildiği gibi güneş panellerindeki elektrik üretimi sırasındaki oluşan ısı, ışınım ve taşınım ile çevreye yayılmaktadır. Isının ekserjisi Eşitlik (9a)'da belirtilmiştir [13]. Eşitlikten de görüleceği üzere ısının ekserjisi, sistemden çevreye transfer olan ısı, çevre sıcaklığı ve modül (parça) sıcaklığı ile ilişkilidir. Ekserji yıkımı (kayıbı) ise Eşitlik (9b) ile ifade edilir.

$$\dot{E}_{XI} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_a}{T_m} \right) \quad (9a)$$

$$\dot{E}_{XK} = T_a \frac{\Delta S_{top}}{\Delta t} \quad (9b)$$

Çevreye yayılan ısı, Eşitlik (10)'da gösterildiği gibi toplam ısı transfer katsayısı, toplam güneş paneli yüzey alanı ve modül sıcaklığı ile çevre sıcaklığının farkı ile ilişkilidir.

$$\dot{Q} = UA (T_m - T_a) \quad (10)$$

Toplam ısı transfer katsayısı, ışınım ve taşınım ısı transfer katsayılarının toplamı şeklindedir [14].

$$U = h_t + h_r \quad (11)$$

Isı taşınım katsayısını etkileyen önemli faktörlerden biri de rüzgâr hızıdır. Eşitlik (12)'deki bağıntı ile ısı taşınım katsayısı elde edilir [14].

$$h_t = 2,8 + 3V_w \quad (12)$$

Güneş panellerinde oluşan ısı, taşınım ile birlikte ışınım yoluyla da çevreye transfer olmaktadır. Isı ışınım katsayısını belirleyen faktörler, güneş panellerinin yayma katsayısı, modül ve gökyüzü sıcaklığıdır. Modül ile çevre arasındaki ışınım transfer katsayısı, Eşitlik (13)'de verilmiştir [14].

$$h_r = \sigma \varepsilon (T_m + T_g) + (T_m^2 + T_g^2) \quad (13)$$

Modül ve gökyüzü sıcaklığının artması ile ışınım transfer katsayısı (h_r) artacaktır. Efektif gökyüzü sıcaklığının değeri, çevre sıcaklığı ile ilişkilidir ve Eşitlik (14)'deki bağıntıyla ifade edilmektedir [10, 14, 15].

$$T_g = T_a - 6 \quad (14)$$

Modül sıcaklığı, enerji ve ekserji verimleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Modül sıcaklığı, nominal çalışma sıcaklığı ve ışınım değeri kullanılarak Eşitlik (15) ile belirlenebilir [16]. Nominal çalışma koşullarında, güneş ışınım şiddeti, rüzgâr hızı, çalışma sıcaklığı ve hava kütlesi değerleri belirlenmiştir. Nominal çalışma koşullarında, ışınım şiddeti 1.000 W/m², rüzgâr hızı 1 m/s, çalışma sıcaklığı 20 °C, hava kütle indeksi ise 1,5 kabul edilmiştir [14, 17,18].

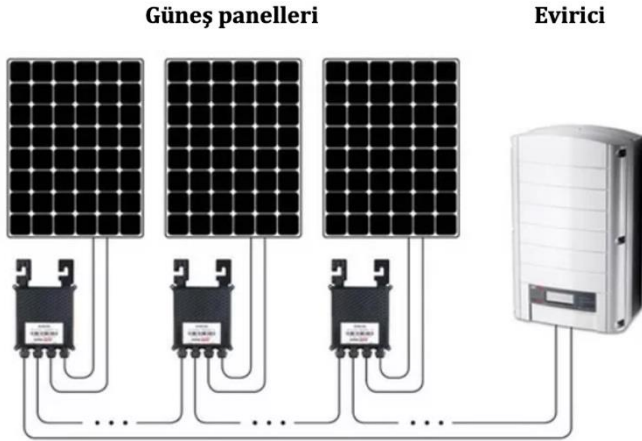
$$T_m = T_a + (NOCT - 20) \frac{G}{800} \quad (15)$$

Güneş paneli tarafından üretilen elektriğin, sahip olduğu (elektriksel) ekserji ise Eşitlik (16)'da verilen bağıntıyla belirlenmektedir [14, 18].

$$\dot{E}_{xe} = VocIscFF \quad (16)$$

2.3. Deneysel Çalışma

Çalışmada Kayseri'de gerçekleştirilen 1,21 MW kurulu gücündeki güneş enerjisi santralının, enerji ve ekserji verimleri elde edilmiştir. Santralde her biri 260 W gücünde toplam 4.692 adet güneş paneli ayrıca her biri 60 W elektrik çıkışı sağlayan, 17 adet evirici kullanılmıştır (Şekil 1). Burada çevre sıcaklıkları, güneş ışınım değerleri ve santraldeki güneş panelleri tarafından üretilen elektrik miktarları ölçülmüştür. Çevre sıcaklıkları ve güneşin ışınım değerleri, meteoroloji istasyonu vasıtasıyla ölçülmüştür. Pratik uygulamalardan ve literatürdeki kaynaklardan da [16] anlaşıldığı üzere güneş ışınımın ölçülen değerleri ile hesaplanan değerleri arasında, genel olarak %5-%10 arasında değişen bir farklılık olduğu bilinmektedir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Figure 1. Schematic figure of the experiment setup

Santralde güneş panelleri dizilimi 25° yerleşim açısı ile yapıldığı için ışınımölçer de 25° yerleşim açısı ile konumlandırılmıştır. Güneş panelleri tarafından üretilerek eviricilere giren elektriğin miktarı, eviricilerdeki elektronik ara yüz vasıtasıyla belirlenmiştir. Rüzgâr hızı üreticiler tarafından nominal çalışma koşulu olarak öngörülen değer olan, 1 m/s alınmıştır [18].

Modül sıcaklığı Eşitlik (15) yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan yüzey alanı ise toplam güneş paneli sayısı ile güneş panelinin alanı çarpılarak elde edilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan katsayılar, Tablo 1'de verilmiştir. Havanın açık olduğu günler test günleri olarak belirlenmiştir. Ayrıca test günlerinin belirlenmesinde, güneş panellerinin tozsuz ve temiz olmasına dikkat edilmiştir. 2017 yılı Haziran-Ağustos (3 aylık) döneminde, her ay 5 gün olmak üzere toplamda 15 günlük performans verileri kullanılmıştır.

Tablo 1. Hesaplamalarda kullanılan katsayılar [10]

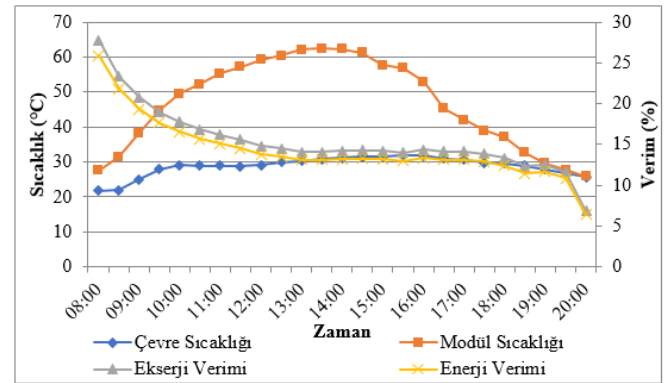
Table 1. Coefficients used in calculations [10]

Özellikler	Birim	Değer
Stefan-Boltzmann katsayısı (σ)	W/m ² K ⁴	5,67 x 10 ⁻⁸
Güneş panelinin yayma katsayısı (ε)	-	0,9
Güneşin sıcaklığı (T_s)	K	5.780

3. Bulgular

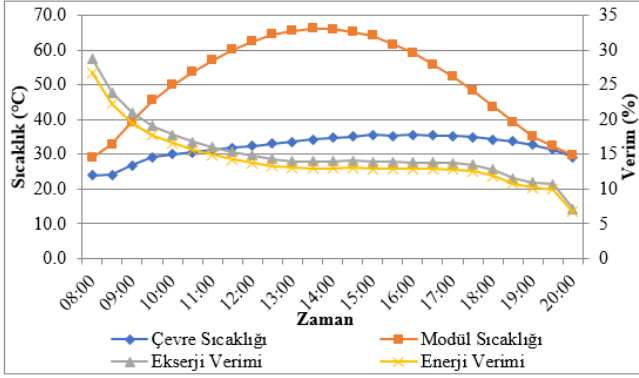
Şekil 2'de Haziran ayındaki ortalama modül sıcaklığına bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi verilmiştir. Çevre (ortam) sıcaklığının artışı, doğal olarak modül sıcaklığını arttırmaktadır. Modül sıcaklığının artması, hem enerji hem de ekserji veriminin azalmasına neden olmaktadır. Temmuz ve Ağustos aylarında da benzer değişim görülmektedir (Şekil 3 ve Şekil 4).

Haziran ve Temmuz aylarında (ortalama) ekserji verimi en yüksek %27,7 ve % 28,7 olarak elde edilmiştir. Enerji verimi ise aynı aylarda %25'in üzerinde gerçekleşmiştir (Şekil 2 ve Şekil 3). Haziran ayında ortalama ortam sıcaklığı, en yüksek 31,7 °C olarak ölçülmüştür. Buna karşılık modül sıcaklığının ortalama değeri, Haziran ayında en yüksek 62,4 °C olmuştur (Şekil 2). Çevre sıcaklığının sınırlı artışına karşılık modül sıcaklığı daha fazla artmıştır. Bu artışın nedeni, ışınlama birlikte güneş panelindeki hem elektrik hem de ısı üretiminin artmasıdır. Temmuz ayında ortam sıcaklığının ortalama değeri en yüksek 35,5 °C, modül sıcaklığı ortalama değeri ise en yüksek 66,1 °C olarak belirlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Haziran ayı ortalama modül ve çevre sıcaklıkları, enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

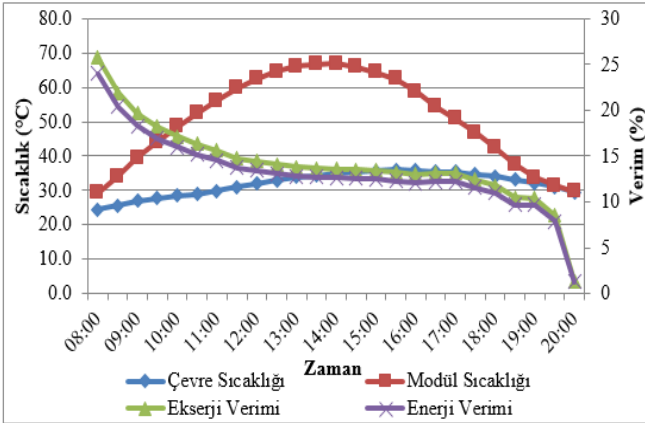
Figure 2. Changes of average module and environment temperatures, energy and exergy efficiencies in June



Şekil 3. Temmuz ayı ortalama modül ve çevre sıcaklıkları, enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

Figure 3. Changes of average module and environment temperatures, energy and exergy efficiencies in July

Ağustos ayı en yüksek ortalama ortam ve modül sıcaklıkları 35,9 °C ve 67 °C' olarak ölçülmüştür. Ağustos ayı ortalama enerji verimi en yüksek %24, ortalama ekserji verimi ise en yüksek %25,7 olarak belirlenmiştir (Şekil 4).



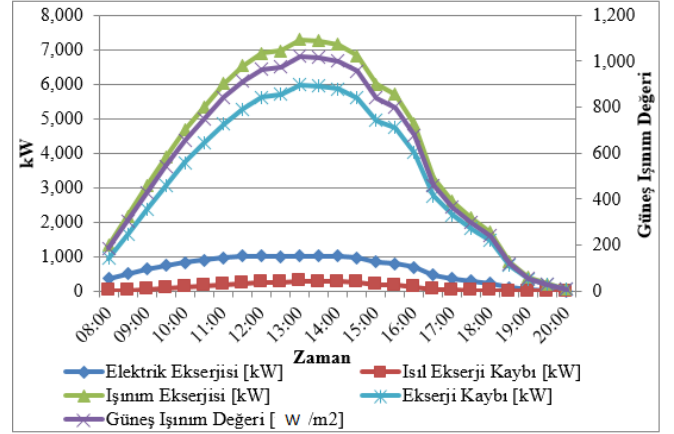
Şekil 4. Ağustos ayı ortalama modül ve çevre sıcaklıkları, enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

Figure 4. Changes of average module and environment temperatures, energy and exergy efficiencies in August

Güneş ışınım değerinin artması, elektrik ve ısıtım ekserji değerlerinin artmasına neden olmuştur. Haziran–Ağustos dönemindeki ortalama ısıtım ekserji(güç) değeri, en yüksek 7.000 kW'ın üzerine çıkmıştır. Bu dönemde ortalama güneş ışınım güç değerleri ise 1.000–1.100 kW/m² arasında gerçekleşmiştir (Şekil 5-7).

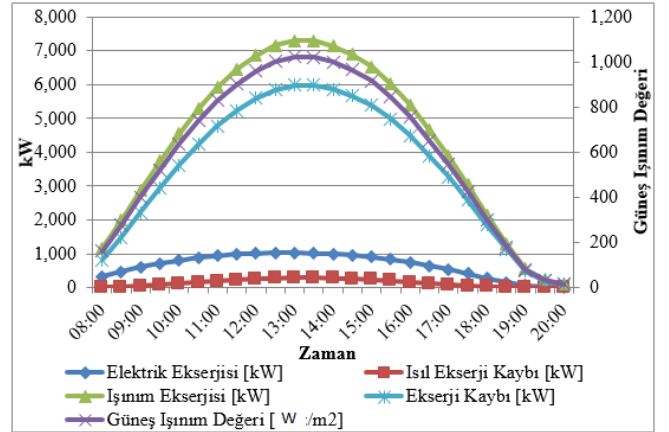
Sistemdeki ısı ekserji kayıpları (Şekil 5–7) daha sınırlı gerçekleşmiştir.

Ekserji veriminin en yüksek olduğu sabah saatlerinde bile tersinmezliklerden dolayı oluşan ekserji kayıpları, %70'in üzerindedir (Şekil 8).



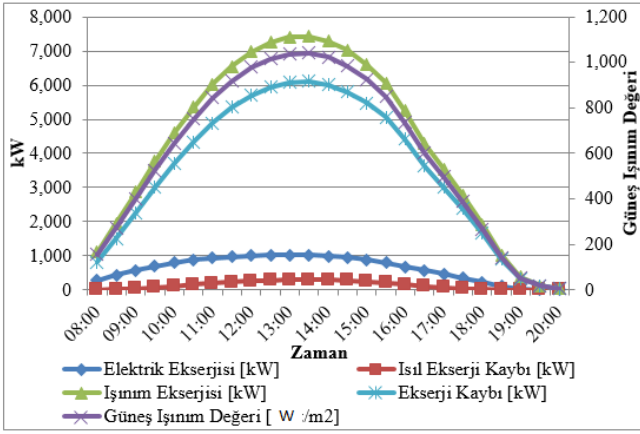
Şekil 5. Haziran ayı ortalama güneş ışınımı (0–1.200 W), elektriksel ekserji, ısıtım ekserjisi ve ekserji kayıplarının değişimi (0–8.000 kW)

Figure 5. Changes of average solar radiation (0–1,200 W), electrical exergy, radiation exergy and exergy losses (0–8,000 kW) in June



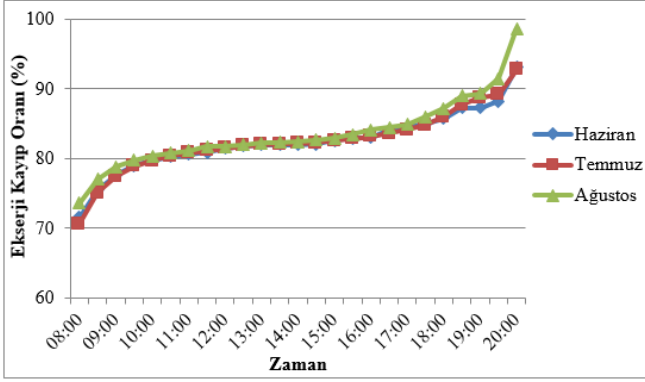
Şekil 6. Temmuz ayı ortalama güneş ışınımı (0–1.200 W), elektriksel ekserji, ısıtım ekserjisi ve ekserji kayıplarının değişimi (0–8.000 kW)

Figure 6. Changes of average solar radiation (0–1,200 W), electrical exergy, radiation exergy and exergy losses (0–8,000 kW) in July



Şekil 7. Ağustos ayı ortalama güneş ışınımı (0–1.200 W), elektriksel ekserji, ışınlım ekserjisi ve ekserji kayıplarının değişimi (0–8.000 kW)

Figure 7. Changes of average solar radiation (0–1,200 W), electrical exergy, radiation exergy and exergy losses (0–8,000 kW) in August



Şekil 8. Tersinmezliklerden dolayı oluşan ekserji kayıp oranları

Figure 8. Exergy losses ratios due to irreversibilities

4. Sonuç

Yapılan çalışma sonucunda, fotovoltaik güneş panellerinin enerji ve ekserji verimlerinin düşük olduğu görülmektedir. En büyük ekserji kaybının, güneş panelinin elektrik üretimi sırasındaki tersinmezliklerden kaynaklı olduğu belirlenmiştir.

Modül sıcaklığının artması, tersinmezlikleri artırmaktadır. Bu bakımdan sabah saatleri, ekserji veriminin en yüksek olduğu zamandır. Sabah saatlerinde çevre ve modül sıcaklıkları düşük olduğundan, enerji ve ekserji verimleri, günün diğer saatlerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Bilindiği gibi güneş ışınlım değeri, ekserji verimini artıran önemli bir unsurdur. Güneş panelinin verimi ise sistemde yapılacak bazı iyileştirmelerle artırılabilir.

Semboller

A	Güneş panelinin yüzey alanı [m ²]
\dot{E}	Birim zamandaki enerji (güçü) (kW)
\dot{E}_{XC}	Sistemden çıkan ekserji (güçü) [kW]
\dot{E}_{Xe}	Elektriksel ekserji (güçü) [kW]
\dot{E}_{XG}	Sisteme giren ekserji (güçü) [kW]
\dot{E}_{XI}	Isıl ekserji (güçü) [kW]

\dot{E}_{XK}	Yıkıma uğrayan ekserji (güçü) [kW]
FF	Güneş panelinin dolun çarpanı
G	Güneş ışınlım değeri [W/m ²]
h_r	Isı ışınlım katsayısı [W/m ² K]
h_t	Isı taşınım katsayısı [W/m ² K]
I	Güneş paneli tarafından üretilen akım [A]
I_{mp}	En yüksek güç üretiminde akım değeri [A]
I_{sc}	Güneş panelinin kısa devre akımı [A]
$NOCT$	Güneş panelinin (hücrelerinin) nominal çalışma sıcaklığı [°C, K]
P_e	Güneş paneli tarafından üretilen elektriksel güç [W]
P_{max}	Güneş panelinden elde edilen en yüksek elektriksel güç [W]
\dot{Q}	Çevreye transfer olan ısı [kW]
\dot{Q}_g	Giren ısı [kW]
ΔS_{top}	Toplam entropi değişimi (üretimi) [kJ/K]
Δt	Süre (s)
T_a	Çevre (Ortam) sıcaklığı [°C, K]
T_g	Gökyüzünün sıcaklığı [°C, K]
T_m	Modül (Parça) sıcaklığı [°C, K]
T_s	Güneşin sıcaklığı [°C, K]
U	Toplam ısı kaybı katsayısı
V	Güneş paneli tarafından üretilen gerilim [V]
V_{mp}	En yüksek güç üretimindeki gerilim değeri [V]
V_{oc}	Güneş panelinin açık devre gerilimi [V]
V_w	Rüzgâr hızı [m/s]
ε	Güneş panelinin yayma katsayısı
η_e	Enerji verimi (%)
η_{EX}	Ekserji verimi (%)
σ	Stefan–Boltzmann katsayısı [W/m ² K ⁴]

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar katkılarının beyanı

Her iki yazar, kaynak araştırması, hesaplamalarının yapılması, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

Kaynaklar

- [1] <http://www.enerji.gov.tr> (Erişim Tarihi: 05.01.2024).
- [2] Cengel, Y. A. ve M. A. Boles. 2006. Thermodynamics: An Engineering Approach. Fifth Edition. Mc Graw Hill, 424s.
- [3] Ndiaye, A., M. F. Kébé, C., Ndiaye, P. A., Charki, A., Kobi, A. and Sambou, V. 2013. Impact of Dust on The Photovoltaic (PV) Module Characteristics after An Expositionyear in Saheli an Environment: Thecase of Senegal, International Journal of Physical Sciences, Vol. 8(21), s. 1166-1173. DOI: 10.5897/IJPS2013.3921
- [4] Şahin, A. D., Dinçer, İ. and Rosen, M. A. 2007. Thermodynamicanalysis of Solar Photovoltaic Cell Systems, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91(2-3) , s. 153-159. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.07.015
- [5] Bejan, A., Tsatsaronis G., Moran M. 1996. Thermal Design and Optimization. John Wiley&Sons, New York.

- [6] Kotas, T.J. 1985. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Butterworth–Heinemann, 29s.
- [7] Wong, K.F.V. 2000. *Thermodynamics for Engineers*. Second Edition. CRC Press, Taylor@Francis Group, s. 4.1–4.2.
- [8] Hepbasli, A. 2008. A Key Review on Exergetic Analysis and Assessment of Renewable Energy Resources for a Sustainable Future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, s. 593–661. DOI:10.1016/j.rser.2006.10.001
- [9] Elhadj Sidi, C. E. B., Ndiaye, M. L., Ndiaye, A. and Ndiaye, P. A. 2015. Outdoor Performance Analysis of a Mono Crystalline Photovoltaic Module: Irradiance and Temperature Effect on Exergetic Efficiency, *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 10(11), s. 351–358. DOI: 10.5897/IJPS2015.4356
- [10] Sudhakar, K. and Srivastava, T. 2013. Energy and Exergy Analysis of 36 W Solar Photovoltaic Module, *International Journal of Ambient Energy*, 35(1), s. 51–57. Article ID: IJMET_09_06_086
- [11] Petela, R. 2003. Exergy of Undiluted Thermal Radiation, *Solar Energy*, 74, s. 469–488. DOI:10.1016/S0038-092X(03)00226-3
- [12] Petela, R. 2008. An Approach to the Exergy Analysis of Photosynthesis, *Solar Energy*, 82(3), s. 11–328. DOI:10.1016/j.solener.2007.09.002
- [13] Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H. and Behzadmehr, A. 2010. Exergetic Performance Evaluation of a Solar Photovoltaic (PV) Array, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (3), s. 502–519
- [14] Ravat, P. 2017. Exergy Performance Analysis of 300 W Solar Photovoltaic Module, *International Journal of Engineering Sciences&Research Technology*, 3, s. 317–390. DOI: 10.5281/zenodo.438094
- [15] Shukla, A., Khare, M. and Shukla, K. N., 2015. Experimental Exergetic Performance Evaluation of Solar PV Module, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(1), s. 1–9
- [16] Kumar, P., Gupta, V., Sudhakar, K. and Kumar Singh, A. 2016. Experimental Analysis of Comparative Temperature and Exergy of Crystalline (c-Si) and Amorphous (a-Si) Solar PV Module Using Water Cooling Method, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(5), s. 21–26. DOI: 10.9790/1684-1305032126
- [17] Nuhoglu, S. 2017. Tek Eksen Güneş Takipli Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Konya İçin Örnek Bir Uygulama. T.C. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 28s, Konya.
- [18] Joshi, A. S., Dincer, I., and Reddy, B. V. 2009. Thermodynamic Assessment of Photovoltaic Systems, *Solar Energy*, 83 (8), s. 1139–1149. DOI: 10.1016/j.solener.2009.01.011



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESI

Mechanical Performance on Flax Fibre Epoxy Composites Filled with Montmorillonite Nanoclay for Lightweight Applications

Hafiflik Özelliği Gerektiren Uygulamalar İçin Keten Fiber Esaslı Montmorillonite Nanokil Katkılı Epoksi Kompozitlerin Mekanik Performanslarının Belirlenmesi

Aybike Çelik¹ , Yeliz Pekbey^{2*} 

^{1,2}Ege University, Mechanical Engineering Department, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: yeliz.pekbey@ege.edu.tr

Abstract

The objective of this study is to investigate the mechanical performance on develop flax/epoxy composite filled with montmorillonite nanoclay for lightweight applications. For this purpose, firstly, nanoclay at different weight percentages montmorillonite nanoclay such as 0.5, 1, 1.5 was dispersed homogeneously into epoxy resin with the help of ultrasanitization process. For better nanoclay distribution in composite, the montmorillonite nanoclay concentration higher than 1.5% was not analyzed. Secondly, using this mixture, flax fiber based composites were produced by vacuum bag molding process. Finally, the mechanical properties of flax/epoxy composites filled with different percentages montmorillonite nanoclay were determined with tensile, flexural, and in-plane shear test. From the experimental results obtained, the addition of montmorillonite nanoclay indicate positive effect on the performance of the composites compared with the neat composite samples, if the montmorillonite nanoclay distribute homogeneously in the epoxy. The composites added with 0.5 wt.% nanoclay showed the highest tensile modulus and tensile strength. Moreover, the elasticity modulus of composite samples with 0.5% nanoclay addition is approximately 87% higher than the pure composite. Also, the composite samples loaded with 1.5 wt.% of montmorillonite nanoclay performs better under flexural loading conditions.

Keywords: Biocomposite, montmorillonite nanoclay, natural fiber, mechanical performance, in-plane shear characteristics

Öz

Bu çalışmanın amacı, hafiflik özelliği gerektiren uygulamalar için, montmorillonit nanokil ilave edilmiş keten fiber esaslı-epoksi kompozit malzemelerin mekanik performansını araştırmaktır. Bu amaca yönelik olarak, ilk olarak, 0,5, 1, 1,5 gibi farklı ağırlık yüzdelerinde montmorillonit nanokil, epoksi reçine içerisine ultrasanitasyon işlemi yardımıyla homojen bir şekilde dağılması gerçekleştirilmiştir. Epoksi reçine içerisine ilave edilen nanokil miktarı, daha iyi homojen karışım olması için %1,5 sınır değeri olarak belirlenmiştir. İkinci olarak, bu karışım kullanılarak keten fiber esaslı kompozitler vakum poşet kalıplama yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak farklı yüzdelerde montmorillonit nanokil ile doldurulmuş keten/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri çekme, eğilme ve düzlem içi kayma testleri ile belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarında, eğer montmorillonit nanokilin epoksi içinde homojen bir şekilde dağılması durumunda, keten fiberli/epoksi kompozit malzemenin mekanik performansının nanokil katkısız kompozite göre iyileşme sağlandığı görülmüştür. Ağırlıkça %0,5 nanokil ilave edilen kompozitler en yüksek çekme modülünü ve çekme mukavemetini göstermişlerdir. Dahası, ağırlıkça %0,5 nanokil katkılı kompozit numunelerin elastisite modülü, katkısız kompozite göre yaklaşık %87 daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca, ağırlıkça %1,5 montmorillonit nanokil ile yüklenen kompozit numuneler, eğilme yükleme koşulları altında daha iyi performans göstermişlerdir.

Anahtar Kelimeler: Biokompozit, montmorillonit nanokil, doğal fiber, mekanik özellik, düzlem-içi kayma karakteristikleri

1. Introduction

In recent years, because of global warming and boosting environmental problems, it is important the use of environmentally friendly composites. The use of plant materials such as kenaf, hemp, flax, bamboo, ramie etc. like biodegradable materials has increased in industrial areas due to their lightness and lower traces of carbon attack compared to other reinforcement elements fibers like glass and carbon. Particularly flax fiber is an environmentally friendly and sustainable material stand out as alternatives and composite materials high strength,

low density when used in production and offers advantages such as superior thermal properties.

Natural fibers are recyclability, and easily disposable in nature and they also have high mechanical properties as well as light weight and minimal price [1]. It is given the examples for the natural fibers such as, flax, jute, kenaf [2]. However, the nature of plant fibers and matrix materials have drawbacks such as weak interfacial bonding moisture absorption. Natural fibers perform as hydrophobic by chemical treatments [3].

Recently, various studies have performed the composite properties by adding nanoparticles into the matrix [4-29].

Homogeneous distribution of nanoparticles in matrix elements is important to make better properties of composites such mechanical and morphological. Flax in combination with nanoparticles serves for multifunctional composites.

It has been reported that nanoclays with plant materials have been provided benefits such as higher impact strength, fracture toughness, ballistics, impact properties [5-11].

Flax fiber has been used as filler in composites due to lightness. Flax fiber has average tensile strength ranging between 500 and 1500 MPa. Flax fiber is a lightweight fiber having a density of approximately 1.5 g/cm³ and Young's modulus of 27.6 GPa. Due to its lightweight nature, flax fiber is used for various applications [3].

Plant materials in combination with nano particles have been used for multifunctional plant materials/matrix composites [11-15]. Due to its properties such as massive polymer nanoclay contact polymer interface and high aspect ratio, montmorillonite (MMT) is often added for dispersion in epoxy [1].

Numerous studies have shown that the addition of nanoclay and plant fiber can enhance the performance of composites. It is listed in Table 1 the latest studies on natural fiber and nano composites.

Table 1. Latest studies on natural fiber and nano composites

Year	Ref.	Type of Fiber/matrix/ Fillers	Remarks
2023	[16]	hemp fiber/flax fiber reinforced composites	The properties of composites have improved.
2023	[17]	alkali-activated concrete mixtures	The compressive strength of composite is increased.
2023	[18]	hybrid composites composed of synthetic and natural fibers	Composed of synthetic and natural fibers are used in longevity and durability practice.
2023	[19]	A extensive literature review of natural fiber reinforced polymer composites.	It was discussed the tribo mechanical characteristics of natural fiber reinforced polymer composites.
2023	[20]	kusha grass fibre, copper fibre and Emu fibre.	It has been observed that the bending strength of emu fiber reinforced composites decreases as the length and fiber load increases.
2022	[21]	jute and banana fiber as reinforcement	Tensile and bending strength were obtained in 0° fiber oriented composite material with jute fiber.
2022	[22]	woven kenaf, woven polyester and polylactic acid	The tensile, impact strength, and elongation was improved via woven kenaf.

2022	[23]	flax-basalt-glass woven fabrics	The highest tensile properties of composite was obtained for lightweight applications.
2022	[24]	silica aerogel fillers	The mechanical properties of flax composites increased addition of silica aerogel fillers.
2022	[25]	mechanical characteristics of an epoxy-clay nanocomposite.	The tensile strength of the nanocomposites improved adding treated nanoclay.
2021	[26]	banana fiber and polylactic acid as a resin	The thermal stability and mechanical properties of the polylactic acid were increased via banana fibers.
2021	[27]	sisal and palmyra palm fibers, polymers, nano-clays, and nano-clay	The mechanical properties were improved via the hybrid composites

In a previous study, we investigated the effect of nanoclay (Cloisite 30B), nano silica aerogel on the mechanical, thermal, impact and ballistic features of composites [5, 28].

The objective of this study was to improve natural flax epoxy composite with minimized weight. Montmorillonite nanoclay was chosen as nanofiller in this study for its good mechanical performance [7,9]. The change in tensile, flexural, and in-plane shear properties of flax/epoxy composites were analyzed at various weight percentages of nanoclay fillers. The mechanical performance of the composites with nanoclay was compared with pure(neat) flax epoxy composite [29]. The aim is to determine effect of nanoclay addition on mechanical performance of flax fiber/epoxy composites.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

A flax fabric (Burs Silk Textile Company in Turkey) and resin system was purchased as the major reinforcement phase, while montmorillonite nanoclay (supplied by the Eczacıbaşı Company in Turkey) was used as the secondary reinforcement material. Figure 1 shows natural flax fiber in this study. No surface treatment has been applied to natural flax fabrics.



Figure 1. Natural flax fiber in this study

The Epoxy matrix resin (Momentive MGS L160 and its hardener (Momentive MGS H160) was also purchased by Dost Chemical Company in Turkey. The matrix material is formed with an

epoxy-to-hardener weight ratio of 10:1 as per the manufacturer’s specification. At 25°C, epoxy and hardener have a density of 1.13–1.17 g/cm³ and 0.96–1.0 g/cm³, and a viscosity of 700–900 mPa.s, 10–50 mPa.s respectively.

Table 2. Fabricated flax fiber-epoxy composites

Specimen	% nanoclay	Flax-fiber composite type
1	0	Neat flax-fiber epoxy composite
2	0.5	Flax-fiber epoxy added nanoclay composite
3	1	Flax-fiber epoxy added nanoclay composite
4	1.5	Flax-fiber epoxy added nanoclay composite

In this study, as shown in Table 2, the composites were fabricated on 4 samples (Epoxy-Neat), (99.5 wt percent Epoxy-0.5wt. percent nanoclay), (99 wt percent Epoxy-1wt percent nanoclay), (98.5 wt percent Epoxy-1.5wt. percent nanoclay).

2.2. Preparation of flax fiber-epoxy composites

It is important the procedures in manufacturing of composites due to changing properties of composites.

The preparation of composites was performed in five different stages. In the first stage, the natural flax fibers were washed to remove dirt (Figure 2).



Figure 2. Cleaning the flax fabrics

During the second stage, cleaning the flax fabrics clay was added within the epoxy via ultrasonication procedure for better distribution in epoxy. If there is no proper nanoscale dispersion, the mechanical properties of composites get worse due to fracture propagation. For this reason, it is obviously clear that the nanoclay is dispersed in the epoxy. The montmorillonite nanoclay particles and epoxy resin are blended together quickly by ultrasonic stirrer (Hielscher UP400St) with the frequency of 24 kHz for 40 min [29]. The ice bucket was used to dissipate heat since the heat was occurred during ultrasonication. The basic epoxy was formed by blending 80% resin with 20% hardener. The first mixture consisted of 99.5 wt% epoxy and 0.5 wt% of montmorillonite nanoclay.

During the third stage, the same procedure was used to make the 1% and 1.5 wt% montmorillonite nanoclay. For better nanoclay distribution in composite, the montmorillonite nanoclay concentration higher than 1.5% was not analyzed. Figure 3 shows mixing of epoxy and nanoclay via ultrasonication process.



Figure 3. Mixing of epoxy and nanoclay via ultrasonication process

Following sonication process, the hand layup followed by vacuum bag molding process were fulfilled to manufacture composite. The flax epoxy composites with nanoclay were prepared by using hand layup stacking followed by vacuum bag molding process (Figure 4). Flax fabrics in 500 mm x 500 mm dimensions were cut. The resin system was distributed on 10 layers of flax fiber by rolling it evenly to each layer using a roller.

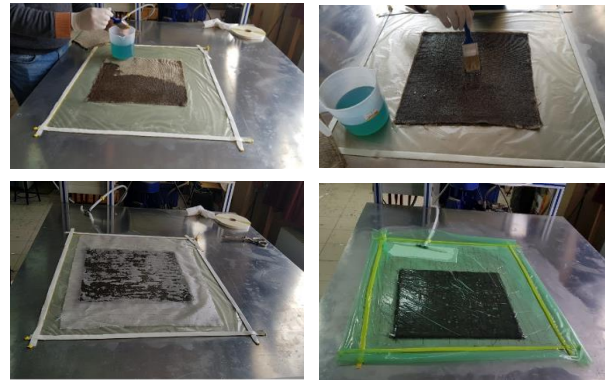


Figure 4. The fabrication of composite laminates

It was used a mould consisting of a top plate, bottom plate and two spacers. As shown in Figure4, it was used vacuum nylon and vacuum sealing tap for the mold system. The infiltration process lasted about 35 min for panels. At the end of this procedure, curing process was continued. The flow channel was surrounded by a silicon.

Finally, Tthe flax fiber-epoxy composite plates with various nanoclay were cut shape test coupons by using a CNC router accordance with ASTM guidelines for mechanical test. Figure 5 shows the cutting samples from composite plates with CNC router. There was no damage to the sample edges after CNC cutting. The thickness of specimen are 7 mm.



Figure 5. The cutting samples from composite plates with CNC router

2.3. Mechanical Performance Tests

ASTM D3039-17 and ASTM D7264-21 were used for tensile and flexural testing, respectively. The tensile and 3-point flexural tests were conducted using SHIMADZU Autograph AG-IS tensile test instrument having a load cell capacity of 100 kN. All tests have been fulfilled at room temperature.



Figure 6. Tensile, bending and shear set up for testing flax/epoxy composites

For the tensile and 3-point flexural test, four identical samples of each composite were tested, and the average value was noted. Load-displacement curves were recorded for every sample.

The tensile tests were conducted at a crosshead speed of 2 mm/min, while flexural tests were conducted at 1 mm/min.

The flexural strength (σ_f) was calculated by following equation:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2wt^2} \tag{1}$$

where F, L, w and t indicate maximum load, span length, width and thickness of the samples, respectively. The sample size was 136 mm x 13 mm x 7 mm and the span length was 13 mm.

The in-plane shear characteristics of the fabricated flax/epoxy composites were determined using Iosipescu shear test. According to ASTM D7078-20, the dimensions of test specimens are 76 mm length and 56 mm width. A 90° double V-notches were machined at specimen mid-length through its thickness. It was cut into strips with 250 mm long and 25 mm width for tensile test specimens while it was 136 mm long and 13 mm width for flexural test specimens [29].

Figure 6 shows tensile, flexural and shear test apparatus for determining mechanical properties.

2.4. SEM analysis

The SEM analysis was fulfilled on the tested specimens to determine the distribution of montmorillonite nanoclay in composite using Thermo Scientific Apreo S scanning electron microscope with an accelerated voltage of 10 kV. All the surfaces of the samples were coated with a thin layer of gold. Figure 7 illustrates the SEM images at the 50000 mag target. As illustrated in Figure 7, it was observed that the nanoclay additive was distributed homogeneously in the composite.

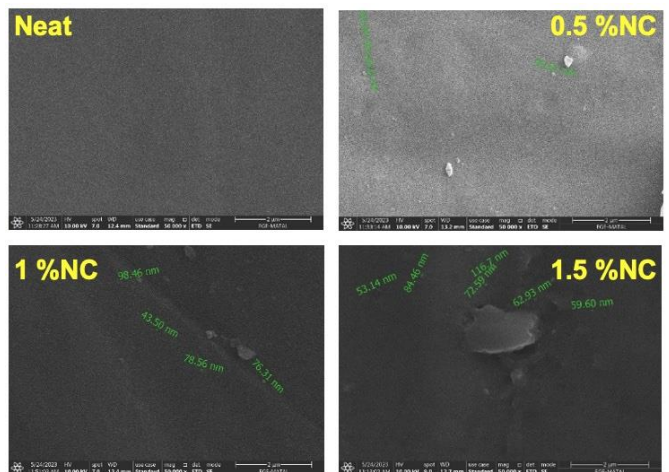


Figure 7. SEM images of nanoclay flax/epoxy composites

3. Results and Discussion

In this section the mechanical properties of montmorillonite nanoclay infused flax fiber epoxy composite have been discussed the obtained experimental results from tensile, flexural and in-plane shear tests.

In general, the mechanical properties of flax reinforced composite have been greatly enhanced by adding the montmorillonite nanoclay. It is obvious that the flax/epoxy nanoclay with 0.5 wt% has a remarkable effect on the tensile, flexural and in-plane shear strength of the composites.

3.1. Tensile properties of flax fibre epoxy composites

The tensile properties of different compositions of flax-epoxy composites are shown in Figure 8 and Table 3.

Table 3. Tensile properties of different compositions of flax-epoxy composites

	Neat	0.5 % Nanoclay	1 % Nanoclay	1.5 % Nanoclay
Tensile Modulus [GPa]	4.21 ± 0.69	5.37 ± 0.62	3.85 ± 0.22	4.03 ± 0.48
Tensile Strength [MPa]	26.81 ± 3.78	50.22 ± 3.31	40.71 ± 3.87	32.14 ± 5.29
Elongation at break [%]	1.04 ± 0.31	1.41 ± 0.21	1.65 ± 0.28	0.97 ± 0.13

It is observed that adding 0.5 wt% of nanoclay filler to composite formulation enhances flax-fiber epoxy resin composite properties including tensile and flexural. As fiber-matrix adhesion and interface bonding between the nanoclay filler increases fiber-matrix adhesion, the composites' stiffness properties is get better compare to pure composites.

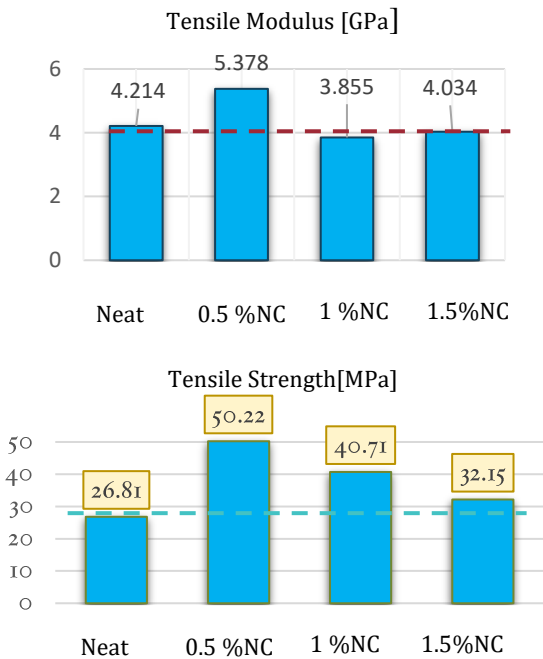


Figure 8. Tensile modulus and strength of neat and nanoclay treated flax fiber epoxy composites

As illustrated in Figure 8, the flax/epoxy nanoclay with 0.5 wt% displayed highest tensile modulus and strength properties compared to other samples. The 0.5 % nanoclay treatment yielded the highest tensile modulus and strength of 5.378 GPa and 50.22 MPa, respectively. As a result, the tensile strength of the composites increased from 26.81 MPa to 50.22 MPa. It can be seen that the concentration of montmorillonite nanoclay strongly affected tensile strength characteristics. The tensile test also showed that tensile modulus slightly increased from neat composites with 0.5 wt% nanoclay but tensile modulus decreased beyond 1 wt% which resulting in a more brittle composite. Also, the tensile modulus of flax epoxy composites with 1.5 wt% nanoclay decreased because of weak interfacial bonding.

3.2. Flexural Properties of flax fiber-epoxy composites

The flexural properties of different compositions of flax-epoxy composites are shown in Table 4. Compared to the three-point bending test results, a different trend of results for flexural modulus can be observed. The 3-point flexural test showed that flexural modulus slightly increased from neat composites to 1.5 wt% nanoclay. The Flexural Strength of neat composites increased from 69.49 MPa to 86.92 MPa when reinforced with 1.5 wt% nanoclay. The value decreased further to 72.32 MPa and 75.17 MPa when nanoclay with 0.5 wt% and 1 wt% respectively. The increasing nanoclay loading makes the flexural strength value higher, suggesting that higher concentrations of nanoclay leads to increased strength. A decrease in bending strength occurred due to the formation of voids in the matrix due to the increasing nanoclay content.

Table 4. Flexural properties of different compositions of flax-epoxy composites

	Neat	0.5 % Nanoclay	1 % Nanoclay	1.5 % Nanoclay
Flexural Modulus [MPa]	3074.10 ± 449.84	2945.73 ± 247.80	3340.55 ± 130.00	3590.17 ± 195.43
Flexural Strength [MPa]	69.49 ± 12.13	72.31 ± 4.98	75.16 ± 12	86.92 ± 6.37
Elongation at break [%]	3.91 ± 0.37	4.30 ± 0.31	3.28 ± 0.29	3.31 ± 0.29

3.3. In-plane shear strength properties of flax fiber-epoxy composites

In-plane shear strength for neat and nanoclay treated composites are illustrated in Figure 9.

When comparing the results, the in-plane shear stress of neat composites increased from 17.63 MPa to 20.68 MPa when reinforced with 0.5 wt% nanoclay. The value decreased 16.77 MPa when nanoclay with 1.5 wt%.

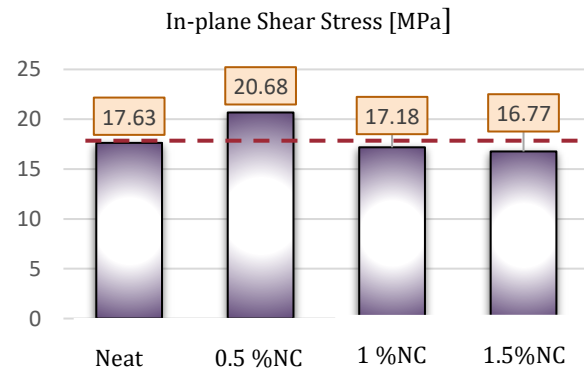


Figure 9. In-plane shear characteristics of neat and nanoclay treated flax fiber epoxy composites

Based on the obtained experimental results, Table 5 sums up different specific properties of the flax fiber epoxy composite with regard to their experimental densities.

Table 5. The percent change results obtained from the experiments

	Montmorillonite nanoclay addition (wt.%)		
	0.5 %	1%	1.5%
Tensile Strength (MPa)	87.32 ↑	51.85 ↑	19.92 ↑
Tensile Modulus (GPa)	27,62 ↑	8.32 ↓	4.28 ↓
Flexural Strength (MPa)	4.06 ↑	8.18 ↑	25.09 ↑
Flexural Modulus (GPa)	4.20 ↓	8.67 ↑	16.78 ↑
In-plane shear test (MPa)	17.30 ↑	2.56 ↓	4.88 ↓

4. Conclusions

In this study, flax-reinforced epoxy composites were infused with montmorillonite nanoclay, and the effect of nanoclay on the tensile, flexural and in-plane shear characteristics was elaborately studied. The following results were obtained:

- ✓ The tensile strength of flax-reinforced epoxy composite increased with addition of montmorillonite nanoclay. The raise in the tensile strength increased with increasing montmorillonite nanoclay in the composites. A maximum increase of 87.32% in the tensile strength was gained with addition of 0.5 wt% montmorillonite nanoclay in comparison with neat composite.
- ✓ Similar trend observed tensile modulus. At the slightly higher montmorillonite nanoclay concentration of 1.5 wt%, the tensile modulus was reduced by almost 4% compared with that of the neat composites without montmorillonite nanoclay. It is thought that reduction in tensile modulus properties of 1 and 1.5 % by weight of montmorillonite nanoclay are caused by this inappropriate dispersion.
- ✓ Reinforced with montmorillonite nanoclay flax- epoxy composites affected the flexural strength of the composites as well. The growth in the flexural modulus for the composites were about 4.06, 8.18, and 25.09% with increasing montmorillonite nanoclay 0 wt% to 0.5, 1, and 1.5 wt%, respectively.
- ✓ Despite the improvements achieved in the tensile and flexural strength with all three concentrations of montmorillonite nanoclay in composites, the reinforcing effect on tensile modulus and in-plane shear test started to deteriorate at 1 and 1.5 wt% nanoclay in flax-epoxy reinforced composites. This decrease can be improper distribution of nanoclay in the composites, their agglomeration, and ineffective adhesion [28].

It is observed that an about 4% increase in the flexural strength was obtained with an addition of 0.5 wt% montmorillonite nanoclay. However, an obvious relationship between the flexural modulus and content of montmorillonite nanoclay were not observed. Trends of reduction in the plane shear tests with

addition of montmorillonite nanoclay were also noticed in previous studies [7,9].

The montmorillonite nanoclay concentration of 0.5 wt% showed optimum improvement in the tensile and flexural properties because of improved fiber matrix adhesion. So the above observations, this study displayed that the addition of montmorillonite nanoclay improved the mechanical properties flax natural fibers of the composite. Thus, flax epoxy composite can also be used composites environment friendly products and the healthy living.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

Ethics committee approval and conflict of interest statement This article does not require ethics committee approval. This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

Acknowledgements

The financial supports of Ege University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project No: FM YLT-2022-75589) are gratefully appreciated.

Author Contribution Statement

Aybike Çelik did material preparation and tests.

Yeliz Pekbey did literature investigation, contributed to methodology, drafting of article and critical review of content and final approval and financial support.

References

- [1] Dias, E., Chalse H., Mutha, S., Mundhe, Y., Ambhore, N., A. Kulkarni, Mache, A. 2023. Review on synthetic/natural fibers polymer composite filled with nanoclay and their mechanical performance: A Review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 77(3), s.916-925. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.059.
- [2] Ankit, R., Sharma, S., Agarwal, D. R., Rinawa, M.L., Subbiah, R., Kumar, P.M. 2022. Investigating the effect of nanoclay content on the mechanical characteristics of natural fiber epoxy composite: A Review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 66, s. 1319-1323. DOI:10.1016/j.matpr.2022.05.139.
- [3] Khan, A., Sapuan, S.M., Siddiqui, V.U., Zainudin, E.S., Zuhri, M. Y. M., Harussani M.M. 2023. A review of recent developments in kenaf fiber/poly(lactic acid) composites research: A Review, *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 253, s. 119-127. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.127119.
- [4] Azhagiri, P., Senthilkumar, N., Palanikumar, K., Deepanraj, B. 2023. Mechanical properties evaluation on hybrid AA6026 composites added with nanoclay and carbon fibers: A Review, *Carbon Letters*, Vol. 33, s. 833-846. DOI: 10.1007/s42823-023-00464-9.
- [5] Ünal, H. Y., Öner, G., Pekbey Y. 2017. Comparison of the experimental mechanical properties and DMA measurement of nanoclay hybrid composites: A Review, *European Mechanical Science*, Vol. 2(1), s. 31-36. DOI:10.26701/ems.356823.
- [6] Meenakshi, C.M., Krishnamoorthy, A. 2018. Preparation and mechanical characterization of flax and glass fiber reinforced polyester hybrid composite laminate by hand lay-up method: A Review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, s. 26934-26940. DOI:10.1016/j.matpr.2018.08.181.
- [7] Ünal, H. Y., Öner, G., Pekbey, Y. 2018. Nanoclay and temperature effects on carbon/fiberglass composite laminates under impact loading: A Review, *Acta Physica Polonica A*, Vol: 134(1), s.159-163. DOI: 10.12693/APhysPolA.134.159
- [8] Manafi, S., Kiahosseini, S.R. 2019. Polytetrafluoroethylene/nanoclay composite as anti-wearing compound: A Review, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 29, s. 25-35. DOI:10.1007/s13726-019-00770-y.
- [9] Yumak, N., Aslantaş, K., Pekbey, Y. 2019. The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of nanostructured hybrid composite plates: A Review, *El-Cezeri*, Vol. 7(1), s. 124-134. DOI:10.31202/ecjse.594734.
- [10] Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T. 2020. A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications: A Review, *Journal of Material Science*, Vol. 55, s. 829-892. DOI:10.1007/s10853-019-03990-y.
- [11] Tareq, M. S. H., Zainuddin, S., Hosur, M.V., Jony, B., Ahsan, M.A., Jeelani, S. 2020. Flexural fatigue and fracture toughness behavior of nanoclay reinforced carbon fiber epoxy composites: A Review, *Journal of*

- Composite Material, Vol. 54(29), s. 4645–4660. DOI:10.1177/0021998320935166.
- [12] Parameswaranpillai, J., Kurian, T., Hameed, N., Yu, Y. 2020. Nanocomposite Materials: Synthesis: A Book, Properties and Applications,” Taylor & Francis Group, New York, 455 s.
- [13] Sharifi, M.J., Azadi, M. 2020. Fabrication of heat-treated nano-clay-composite for improving high-cycle fatigue properties of AlSiCu aluminum alloy under stress-controlled fully-reversed bending loads: A Review, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 235(19), s. 4143–4160. DOI:10.1177/0954406220969731.
- [14] Basiri, A., Dadashi, A., Azadi, M. 2021. Effect of nano-clay addition and heat treatment on tensile and stress controlled low-cycle fatigue behaviors of aluminum-silicon alloy: A Review, Fracture and Structural Integrity, Vol. 57, s. 373–397. DOI:10.3221/IGF-ESIS.57.27.
- [15] Serter, S.; Unal, H.Y., Koc, F., Pekbey, Y., Gizli, N. 2021. Ionic Liquid Functionalized Silica Aerogels as Reinforcing Agents for Epoxy Nanocomposites: A Review, Journal Of Inorganic And Organometallic Polymers And Materials, Vol. 31, s. 2445-2458. DOI:10.1007/s10904-020-01841-x
- [16] Ahmed, S., Sudarsan, S., Parthiban, E., Trofimov, E., Sridhar, B. 2023. Exploration of mechanical properties of hemp fiber/flax fiber reinforced composites based on biopolymer and epoxy resin: A Review, Materials Today: Proceedings. DOI:10.1016/j.matpr.2023.03.790, Article in press.
- [17] Ebrahim, Z., Mastali, M., Maguir, M. 2023. Toward sustainable lightweight durable bricks using alkali-activated hemp-based materials: A Review, Construction and Building Materials, Vol. 369, s. 1-15. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130609.
- [18] Mohammed, M., Jawad, K., Oleiwi, K., Mohammed, A.M., Osman, A.F., Adam, T., Batar, B.O., Gopinath, S.C.B., Dahham, O., Jaafar, M. 2023. Comprehensive insights on mechanical attributes of natural-synthetic fibres in polymer composites: A Review, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 25, s. 4960-4988. DOI:10.1016/j.jmrt.2023.06.148.
- [19] Bhat, A.R., Kumar, R., Kumar, P., Mural, S. 2023. Natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review of Tribo-Mechanical properties: A Review, Tribology International, Vol. 189, s. 108978-33. DOI:10.1016/j.triboint.2023.108978.
- [20] Chandra, V., Dasore, A., Yalamasetti, B., Madhuri, S., Narendar, G. 2023. Flexural behavior of natural fiber epoxy composites: A Review, Materials Today: Proceedings, DOI:10.1016/j.matpr.2023.03.429, Article in press.
- [21] Kumar, C., Baligheid, S.M., Maharudresh, A.C., Dayanand, N., Chetan, T.N. 2022. Development and investigation of the mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composite: A Review, Materials Today: Proceedings, Vol. 50, s. 1626-1631. DOI:10.1016/j.matpr.2021.09.128.
- [22] Azlin, M. N. M., Sapuan, S.M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin E.S. 2022. Effect of stacking sequence and fiber content on mechanical and morphological properties of woven kenaf/polyester fiber reinforced polylactic acid (PLA) hybrid laminated composites: A Review, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 16, s. 1190-1200. DOI:10.1016/j.jmrt.2021.12.046.
- [23] Attia, M.A., El-baky, M.A., Abdelhaleem, M.M., Hassan, A. 2022. Hybrid composite laminates reinforced with flax-basalt-glass woven fabrics for light weight load bearing structures: A Review, Journal of Industrial Textiles, Vol. 51, s. 4622-4664. DOI:10.1177/1528083720960743
- [24] Chandrasekar, M., Shahroze, R.M., Kumar, T.S.M., Senthilkumar, K., Ishak, M.R., Rajini, N., Siengchin S. 2022. Influence of a silica aerogel filler on the mechanical, thermal, and physical properties of flax/epoxy composite: A Review, Mechanics of Composite Materials, Vol. 58, s. 271-282. DOI:10.1007/s11029-022-10028-z.
- [25] Bhat, A.R., Kumar, R., Kumar, P., Mural, S. 2022. Enhancement of the properties of hybridizing epoxy and nanoclay for mechanical, industrial, and biomedical applications: A Review, Polymers, Vol. 14, s. 526-542. DOI: 10.3390/polym14030526.
- [26] Pannu, A.S, Singh, S., Dhawan, V. 2021. Effect of alkaline treatment on mechanical properties of biodegradable composite (BF/PLA) rod: A Review, Materials Today: Proceedings, Vol. 46 (19), s. 9367-9371. DOI:10.1016/j.matpr.2020.02.912.
- [27] Rajeshkumar, G., Arvinth Seshadri, S., Ramakrishnan, S., Sanjay, M. R., Suchart S., Nagaraja, K. C. 2021. A comprehensive review on natural fiber/nano-clayreinforced hybrid polymeric composites: A Review, Materials and Technologies. Polymer Composites, Vol. 42, s. 3687-3701. DOI:10.1002/pc.26110.
- [28] Ünal, H.Y. 2023. Aramid fiber takviyeli silika arojel kompozitlerin balistik ve mekanik performansinin belirlenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 381s, İzmir.
- [29] Çelik, A. 2023. Keten Fiberli- Nanokil Katkili Epoksi Reçineli Kompozit Malzemelerin Mekanik Performanslarının Belirlenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s, İzmir.



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

Development of an Automatic Liquid Dosing System in Microliter Scale

Mikrolitre Ölçeğinde Otomatik Sıvı Dozajlama Sistemi Geliştirilmesi

Serkan Doğanay^{1*}, Kadri Emre Orgun², Ömer Yüce², Haydar Barış Öcal¹, Ayberk Kılıç¹

¹ Department of Mechatronics Engineering, İzmir Kâtip Çelebi University, 35620, İzmir, TÜRKİYE

² Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir Kâtip Çelebi University, 35620, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: serkan.doganay@ikcu.edu.tr

Abstract

The goal of this study is to design a novel automatic liquid dosing system for liquid sampling at the microliter level. For this purpose, a mechatronics system is designed to position a syringe at the desired position in the workspace and then drive its piston to inject the liquid to be sampled. Then, an application-specific algorithm is developed to be able to prepare samples in 3x3, 4x4, and 5x5 sample container arrays with a desired volume. The performance tests are conducted for preparing samples with up to three different liquids. The repetitive experiments are performed for 50 and 100 µL sampling volumes. The results indicated that it is possible to dose a single liquid with the highest average deviation of 3.9%. Moreover, it is found that it is possible to prepare a sample with a mixture of three liquids by the highest average deviation from the reference value of around 3.4% when the targeting sampling volume is 250 µL for each liquid.

Keywords: Automatic liquid dosing, liquid sample preparation, mechatronics system design, micro-dosing

Öz

Bu çalışmanın amacı, mikrolitre seviyesindeki hacimlerde sıvı numunelerin hazırlanabilmesi için özgün bir otomatik bir sıvı dozajlama sistemi tasarımıdır. Bu kapsamda, belirlenen çalışma alanı içerisinde bir şırınganın pozisyonlandırılması ve içerisindeki sıvının boşaltılması için bir mekatronik sistem tasarımı yapılmıştır. Daha sonra, istenilen hacimlerdeki numunenin 3x3, 4x4 ve 5x5'lik numune kabı dizilimlerinde hazırlanabilmesi için uygulamaya özel bir algoritma geliştirilmiştir. Sistemin performansı, numune hazırlanması sırasında üç adete kadar farklı sıvılar kullanılabilecek şekilde test edilmiştir. 50 ve 100 µL numune hacimleri için tekrarlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar bir adet sıvının, en fazla %3.9'luk bir ortalama sapma ile dozajlanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, testler üç farklı sıvı kullanılarak numune elde etmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Bu durumda, her bir sıvıdan 250 µL'lik bir hacim alınarak oluşturulan numunenin, referans olarak verilen hacimden en fazla %3.4'lük bir ortalama sapmaya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otomatik sıvı dozajlama, sıvı numune hazırlama, mekatronik sistem tasarımı, mikro dozajlama

1. Introduction

Technological advancements have led to an increment in the number of engineering devices operating for small-scale handling processes. One of them is the handling of liquids for various purposes [1]. Concerning them, liquid dosing in small amounts is an important concern for numerous applications such as sample preparation [2], point-of-care diagnostics [3], 3D printing [4], inkjet printing [5], etc. Among them, one of the most important is sample preparation for laboratory tests. The main problem in this application is possible volumetric errors due to the conventional manual pipetting of each sample especially in small volumes [6]. Moreover, they are mostly requiring the combination of more than one chemical [7]. This leads the volumetric errors to propagate further for the mixture. To avoid and overcome these errors, many researchers focused on various liquid dosing devices [8]. These devices are mainly driven by piston-like structures [9], piezoelectric actuators [10], pneumatic generators [11], acoustic devices [12], and peristaltic pumps [3].

One of the earliest attempts at liquid dosing in small volumes was made by Lammerink et al. [13]. They combined a thermo-pneumatic actuator and a flow sensor to provide a closed-loop

concept for the process. They focused on the continuous liquid flow with a controlled amount. Their results indicated that it is possible to achieve a flow range within 0-50 µL/min. Streule et al. [14] developed a liquid dosing system called "Pipe-jet" which is actuated by a piezo stack-driven piston. They tested samples with different viscosities within the microliter level. According to the findings, they achieved successful dosing with a coefficient of variation of less than 2%. Lake et al. [15] designed a syringe pump for microfluidics applications. PID and bang-bang controllers were implemented to control the amount of the transferred liquid. The results showed that the reference pressure value can be obtained within the deviations of ±1% and ±5% for PID and bang-bang controllers, respectively. Carvalho et al. [16] developed an autosampler called "OSMAR" which is driven by two combined G-code machines. The system is suitable to handle both liquids and gases with its low-cost design. Their observations confirmed that the system can handle air at the microliter level. The movement precision of the setup was lower than 1%. Samokhin et al. [17] presented a syringe pump mechanism to dose liquids in the analytical laboratory. The syringe pump is capable of both infusing and refilling the empty syringe. They dispensed the liquid in 1 and 5 mL volumes. Their

findings revealed that the systematic error of the system was less than 0.1%. Florian et al. [18] built an automated system for micropipetting of liquids in a 3D workspace called "OTTO". The system was designed according to the requirement of speed and positional resolution for qPCR. They obtained a successful dosing with an average pipetting error of 2.5%. Barthels et al. [19] proposed an automatic liquid handling system for life sciences applications. They used a commercial micropipette which is integrated with a displacement piston. They concluded that the system successfully dispenses the liquids with relative pipetting errors lower than 0.3%. Boppana et al. [6] developed an automated pipetting system for the microliter-level handling of liquids. The system consists of a single board computer, software interface, dual syringe pump, and plunger positioning system. They reported that the accuracy of the system was determined between 98 to 102% and the relative standard deviation was less than 3%.

In perusing the available literature, it is seen that there are many efforts regarding the handling of liquids with different purposes. However, the requirement for novel designs still exists for sampling purposes within an automated technique [20]. This need is more significant, especially in the case of preparing samples in batches with considerable accuracy and precision [21]. In this study, we developed and implemented a mechatronics system that provides an automatic liquid dosing for sample preparation. For this, we first designed a 4-DOF mechanism which is actuated by stepper motors. Then, we integrated a syringe substitution module for changing the syringe for different types of liquids. The system can prepare samples consisting of up to three different liquids without any contamination. Also, the system is adaptable to a varying number of samples within its workspace.

2. Materials and Methods

2.1. Definition of the Problem

Before the design of the mechanical system, it is important to understand the injection of the liquid from the syringe under an applied pressure. Figure 1 depicts the schematic of a single syringe with the given geometrical parameters. Also, the figure includes the required piston pressure (P_p) demonstration combined with the head loss terms.

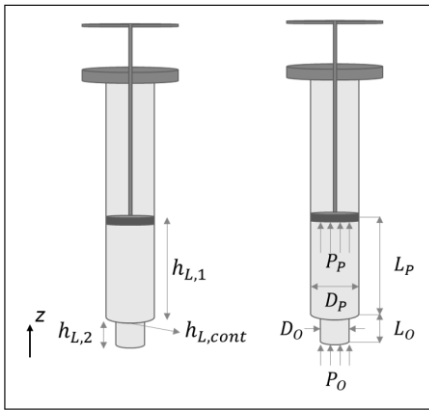


Figure 1. Schematic of a single syringe including geometrical parameters (not scaled), pressure, and head loss terms.

By employing the general energy balance, the required piston pressure (P_p) to dose the liquid can be written as follows [22]:

$$P_p = P_o + \frac{1}{2} \rho (V_o^2 - V_p^2) - \rho g (\Delta z - h_{L,1} - h_{L,2} - h_{L,c}) \quad (1)$$

where P_o is the atmospheric pressure, ρ is the density of the liquid, V_o is the velocity of the liquid at the outlet of the injector, V_p is the velocity of the piston, Δz is the elevation difference between the piston end and the injector tip, $h_{L,1}$ is the head loss through the syringe, $h_{L,2}$ is the head loss through the injector and $h_{L,c}$ is the head loss due to the sudden contraction from syringe to the injector. In Eq.1, the head loss terms are expressed as [23]:

$$h_{L,1} = f_p \frac{L_p}{D_p} \frac{V_p^2}{2g} \quad (2)$$

$$h_{L,2} = f_o \frac{L_o}{D_o} \frac{V_o^2}{2g} \quad (3)$$

$$h_{L,c} = K_{L,c} \frac{V_o^2}{2g} \quad (4)$$

where L_p is the distance between the piston and syringe inner surfaces, L_o is the length of the injector, D_p is the piston diameter, D_o is the injector diameter, f_p and f_o are the friction factors for piston and injector sides and can be found for each side as [23]:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

where Re can be calculated by:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (6)$$

The loss coefficient for sudden contraction in Eq.4 can be determined as [23]:

$$K_{L,c} = \alpha \left(1 - \frac{D_o^2}{D_p^2} \right) \quad (7)$$

In Eq.7, α is the kinetic energy correction factor. Assuming the liquid employed in the syringe is nearly incompressible, the relation between the velocity of the piston and the liquid in the injector can be expressed as follows [24]:

$$V_o = V_p \frac{A_p}{A_o} \quad (8)$$

where A_p and A_o are the cross-sectional areas of the piston and injector, respectively. By considering Eqs.2-8, Eq.1 can be rewritten as:

$$P_p = P_o - \rho g \Delta z + \frac{32\mu(L_o + L_p)}{D_p^2} V_p + \frac{1}{2} \rho \left[\left(1 + \left\{ \alpha \left(1 - \frac{D_o^2}{D_p^2} \right)^2 \right\} \right) \left(\frac{D_p^4}{D_o^4} \right) - 1 \right] V_p^2 \quad (9)$$

Eq.9 depends on the liquid properties and geometrical parameters. Hence, if they are determined as the design criteria, a relation between the velocity of the piston and the pressure applied to the piston can be built. Herein, we employed a syringe with $L_p=75$ mm, $L_o=80$ mm, $D_p=8.8$ mm, and $D_o=0.9$ mm. In the case of using water ($\rho=998$ kg/m³ and $\mu=0.001$ Pa·s), the

maximum absolute pressure required and flow rate depending on the piston velocity are estimated.

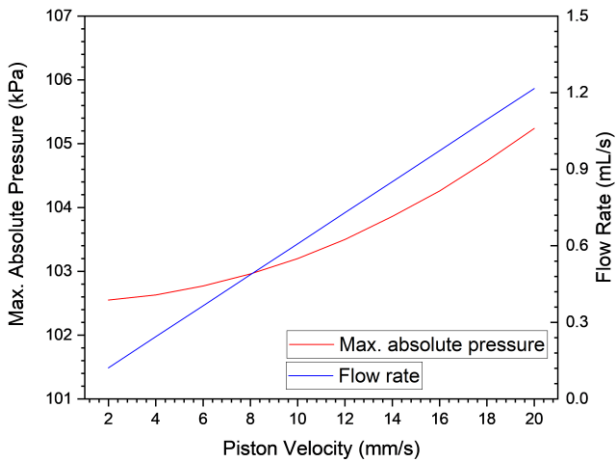


Figure 2. Variation of the maximum absolute pressure and flow rate depending on the piston velocity.

Figure 2 indicates that the piston velocity values between 2-20 mm/s results in a maximum absolute pressure requirement range of 102.5-105.2 kPa and flow rate range of 0.12-1.22 mL/s. To generate these pressure levels regarding the controlled motion of a piston and position the syringe through a sample container array, we developed a 4-DOF mechanism.

2.2. Mechanical Design

Figure 3a depicts the computer-aided design of the automatic liquid dosing system (ALDS). The system consists of a base that is constructed by sigma profiles and four chrome round bars. Then, two more chrome round bars are mounted to the base via four 3D-printed components including linear ball bearings for each. Also, four step motors are utilized and attached to the 3D-printed components, and thanks to the belt and pulley structure (Figure 3b), the system becomes able to provide a plane motion. Following, a syringe position unit (SPU) is assembled to the two chrome round bars with four more linear ball bearings. Therefore, SPU is adapted to be positioned in the plane.

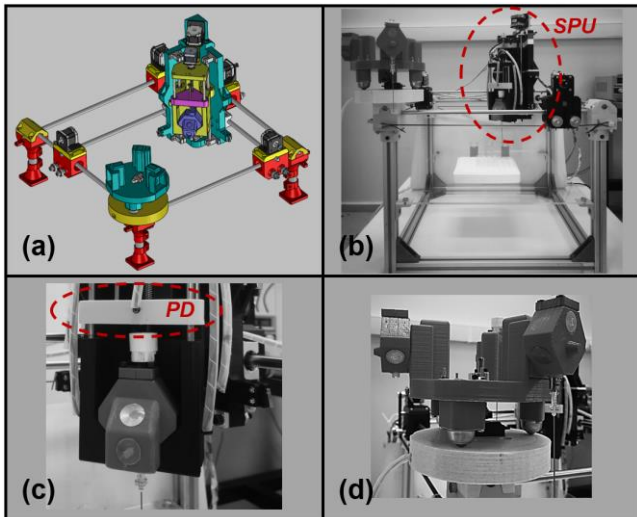


Figure 3. (a) CAD of the mechanism, (b) overall view of the mechanism (c) piston driving unit, and (d) syringe substitution unit.

The SPU includes two step motors, and they are coupled with ball screws to convert rotational motion into linear motion. The first

motor is employed to position the syringe, and the second one is utilized to position the piston of the syringe (Figure 3c). The motions during both syringe and piston positioning are guided by chrome round bars. In the given configuration of the mechanism (Figure 3), it is easy to drive the piston downwards to release the liquid from the syringe, but it is not possible to drive the piston upwards to take the liquid inside the syringe. To make this possible, a ferromagnetic material is mounted to the top of the piston, and an electromagnet is placed on the piston driver (PD). Also, the syringe is kept inside a syringe holder component including three ferromagnetic components. Hence, when it is desired to fill the syringe with liquid, the electromagnet is activated, and magnetic force is used during upward piston motion. Finally, a syringe substitution unit (SSU) is implemented in the system to avoid contamination during sampling via more than one liquid. It is mounted on the corner of the base with three syringes with their holders. To automatically change the syringe with its holder, two permanent magnets are located inside the SSU for each syringe holder, and an electromagnet is located in the SPU. By activating the electromagnet during the sampling process, the syringe with its holder is kept on SPU. When it is required to be substituted for the next liquid, SPU is positioned near SSU, and the electromagnet is deactivated. Therefore, the permanent magnets on SSU attracted the syringe with its holder. Then, SSU is rotated partially via a servo motor, to align the next syringe with its holder. The electromagnet is activated once more, and its magnetic force overcomes the magnetic force of the permanent magnets. So that the positioning of the syringe and its piston is automatically provided with the given mechanism.

2.3. Electronics Design

The electronics design to control the motion of the motors and electromagnets is shown in Figure 4. The components that are utilized in the design are an Arduino Mega microcontroller, a Ramps 1.4 hardware controller, five Nema 17 step motors, a Nema 14 step motor, four motor drivers, two 12V electromagnets, two 24V electromagnets, eight limit switches, a servo motor, and two fans.

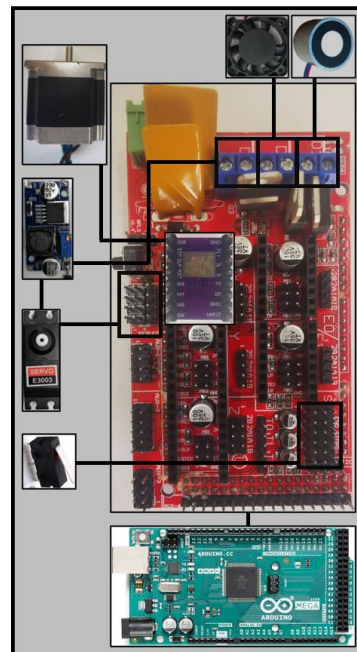


Figure 4. The schematic of electronics components of the system including microcontroller, control card, motor driver, step motor, servo motor, limit switch, voltage regulator, fan, and electromagnet.

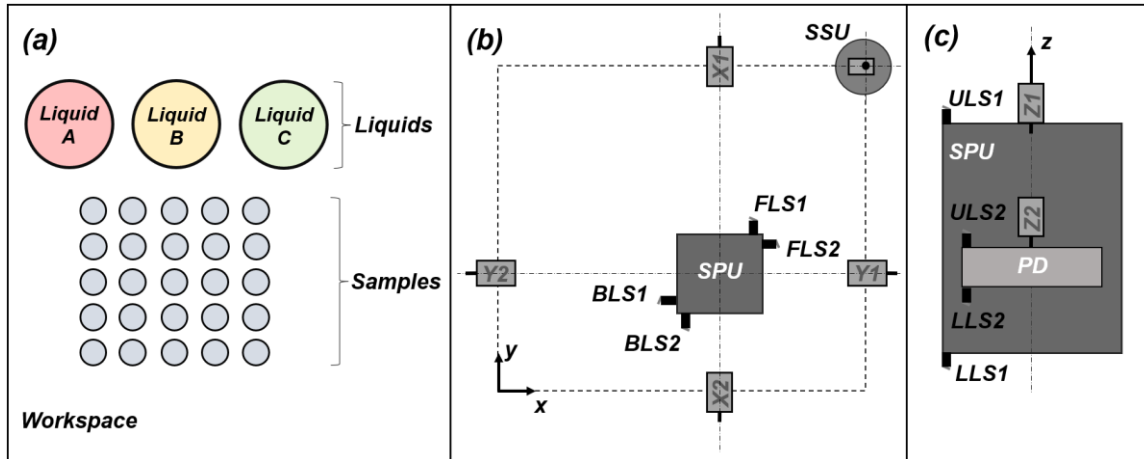


Figure 5. (a) Demonstration of the workspace including the positions of the liquids to be sampled and the samples within a 5x5 array. (b) Schematic of the workspace for the x-y plane motion including positions of step motors, servo motor, limit switches, SPU, and SSU. (c) Schematic of the SPU region including step motors, limit switches, and PD.

The operation of the system is controlled with the Ramps 1.4 hardware controller combined with the Arduino Mega microcontroller. Four Nema 17 step motors are used for the movement of the SPU in the workspace. Then, the position of the syringe and its piston in SPU is provided by a Nema 17 and a Nema 14 step motor, respectively. As shown in Figure 4, limit switches are connected to the pins of the hardware controller to detect the different reference points of the mechanism as the initial position of the SPU, position of the SPU during the syringe substitution, lower and upper limits of the syringe and piston positions. A servo motor is also driven by the hardware controller in the SSU and to power it 5V, a voltage regulator is implemented. To attract each syringe holder from the SSU, two 12V and a 24V electromagnet are used inside the SPU. Also, another 24V electromagnet is used for keeping the contact between the top of the syringe piston and the SPU unit. To drive the 12V electromagnets power is directly supplied from the hardware controller. For the 24V electromagnets, a voltage regulator is employed. Moreover, two fans are used to remove the heat dissipated from electronic components.

2.4. Dosing Algorithm

The proposed mechanism is capable of preparing samples from three liquids without any contamination in its current structure. The schematic of the workspace designed for sampling is depicted in Figure 5a. As is seen from the figure there are two main regions available. The first region includes the liquids to be taken for sampling. The second region is comprised of the samples to be prepared by three different liquids. The schematic includes a demonstration of a 5x5 array of the sample containers. However, the numbers of the sample containers in the array can be adjusted.

To show the motion in the x-y plane, a schematic is also presented in Figure 5b. The origin of the coordinate system in the figure demonstrates the initial reference position for the SPU. X1-X2 and Y1-Y2 represent the step motors in corresponding directions. The position of the SSU is also shown in the corner of the workspace. In the figure, BLS and FLS denote the back limit switch and front limit switch, respectively. To detect the reference for the initial position and the syringe substitution position two limit switch couples are located on the SPU as BLS1-BLS2 and FLS1-FLS2, respectively. Figure 5c depicts the SPU region including PD. As is seen from the figure Z1 motor is used to position the SPU, and the Z2 motor is used to position PD in the z direction. Herein, ULS and

LLS denote the upper limit switch and lower limit switch, respectively. Therefore, to detect the upper and lower limits of the SPU and PD, ULS1-ULS2 and LLS1-LLS2 switches are employed.

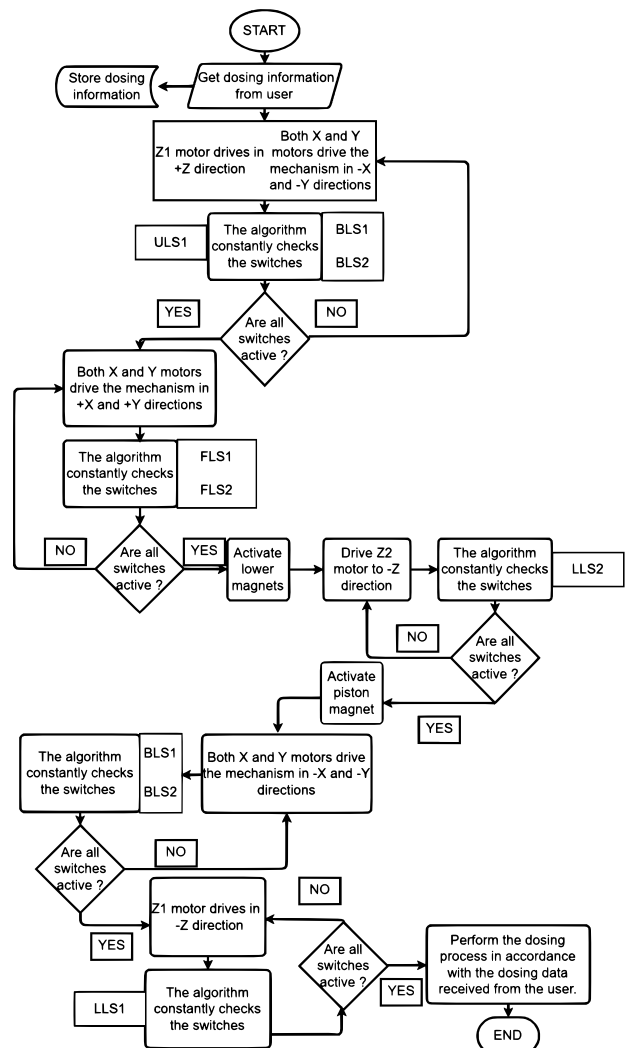


Figure 6. Flowchart of the algorithm of the automatic liquid dosing system.

The flowchart for the algorithm of the automatic liquid dosing system is shown in Figure 6. At the initializing of the process, the dosing information including the number of samples, positions of the samples, sample container height, and the liquid amount from each liquid is defined by the user. Then, the SPU is moved in -x and -y directions to reach the reference initial position. Simultaneously, SPU is moved in the +z direction by the Z1 motor to achieve the upper limit of it. When *BLS1*, *BLS2*, and *ULS1* are enabled, it means the system is at the initial reference point and ready for the syringe-taking process. Then, the SPU is moved in +x and +y directions until *FLS1*, and *FLS2* are enabled which means that the SPU is positioned in front of the SSU. At that moment, the electromagnets on the SPU are activated and the syringe holder is taken with the help of magnetic force generated by them. Following, PD is moved -z direction by the Z2 motor until *LSS2* is enabled. When *LSS2* is enabled, the electromagnet attached to the PD is activated. Hence, the connection between the syringe piston and the PD is provided. After that, SPU is moved in the -x and -y directions to reach the reference initial position again. After reaching this reference point, the Z1 motor moves the SPU in the -z direction until *LSS1* is enabled. Depending on the height of the sample containers, the Z1 motor moves the SPU in +z direction at a certain step defined by the user. Then, dosing starts regarding the defined information by the user at the beginning of the operation. First, Liquid A is taken into the syringe, and then it is extracted to each sample container with the pre-defined amount by controlling the step size of the Z2 motor. After the sampling of Liquid A is completed, the same cycle is repeated for Liquid B and Liquid C.

3. Results and Discussion

During the experiments, the piston velocity is fixed to 12.5 mm. As is seen from Figure 2, this corresponds to 103.6 kPa maximum absolute pressure requirement and 0.76 mL/s flow rate. It is observed that the developed mechatronics system can provide this pressure requirement in the tests. In this operation condition, the *Re* numbers are calculated as 110 and 1073 for the piston and injector regions, respectively. To evaluate the performance of the system, first, the position of the injector tip without sampling any liquid is investigated. During this test, a 3x3 array is utilized which corresponds to nine samples. Positions of the sample containers are determined, and a marker is assembled to the SPU instead of a syringe. Then the system is operated regarding nine samples in a 3x3 array. Therefore, nine points are marked in the workspace. By comparing these marked points with the true positions of the sample containers, a positioning error is determined for each of them.

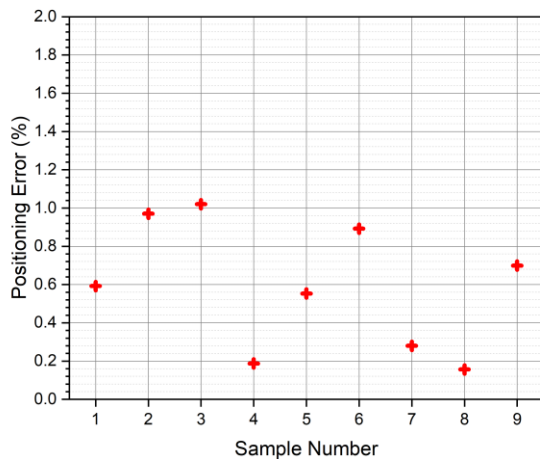


Figure 7. Positioning error (%) of the injector tip for 3x3 sample array.

The positioning errors for the injector tip in the workspace are shown in Figure 7. The positioning errors are calculated by considering the distance from the initial reference point. As is seen from the figure, the maximum positioning error appears around 1% and the average positioning error is found to be 0.6%. In the workspace, we used containers with square cross sections of 10 mm x 10 mm. The maximum positioning error corresponds to a deviation of around 1.2 mm. This means that the obtained positioning error does not affect the sampling process, because it stays in the error margins regarding the sample container dimensions.

Figure 8(a)-(c) depicts the experimental results for two different volumes of 50 and 100 μL . In these experiments, the dosing is made for only one liquid with three repetitions, and they are denoted in the figures as Exp1, Exp2, and Exp3. Also, this procedure is applied for three different sampling arrays of 3x3, 4x4, and 5x5 samples. As is seen from Figures 8(a)-(c), it is possible to dose the liquid precisely with the proposed dosing system. However, it is clearly seen from the figures that the volume of the first sample is considerably lower than the reference value in all cases. This is due to the dead volume of the syringes, which causes a bubble injection inside the syringes during the liquid intake process. This bubble is extracted in the first sampling, where the discharged liquid amount becomes lower. Regarding this observation, we considered the first sample as the outlier, and we did not include them in the accuracy and precision evaluation.

As the performance criteria in the dosing tests, the average deviation definition is employed as:

$$\text{Average deviation} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - x| \quad (10)$$

where *N* is the data number, *x* is the true value, and *x_i* is the value of each data.

Figure 8(a) indicates the dosing within a 3x3 array. In this case, the average deviation from the reference values is found as 1.9% and 2.8% for 50 and 100 μL , respectively. Moreover, it is observed that 67% of the data is in the $\pm 5\%$ range for both 50 and 100 μL . Figure 8(b) depicts the dosing within a 4x4 array. The result in the 4x4 array indicated an average deviation from the reference values of 3.1% and 3.7% for 50 and 100 μL , respectively. In terms of precision, it is found that 71% of the data is in the $\pm 5\%$ range for both 50 and 100 μL . Finally, the dosing results for the 5x5 array are presented in Figure 8(c). It is observed that there is an average deviation from the reference values of 3.6% and 3.9% for 50 and 100 μL , respectively. Besides, it is found that 76% and 78% of the data is in the $\pm 5\%$ range of the 50 and 100 μL , respectively.

According to the obtained results for three different sample arrays, it is possible to dose individual liquids with an average deviation from the reference lower than 4%. It is found that this deviation increases with increasing sample number in the workspace. Another finding is that the system is able to dose an individual liquid within $\pm 5\%$ error range up to 78% for the given cases. This repeatability is obtained for the sampling volume of 100 μL which means that 78% of the samples can be dosed with a maximum 5 μL deviation. When compared to manual dosing in laboratories, this deviation could be evaluated as very acceptable.

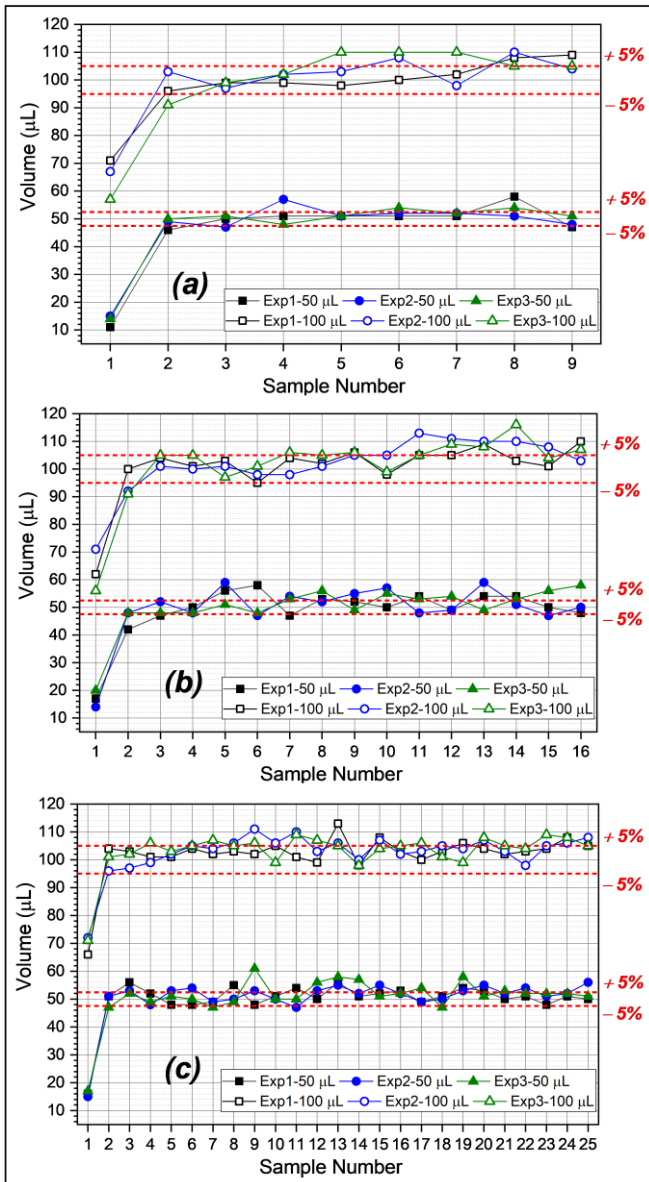


Figure 8. Dosing performance for two different volumes of 50 and 100 μL . Each experiment is conducted for one liquid with three repetitions in the cases of (a) 3x3, (b) 4x4, and (c) 5x5 sampling array.

To investigate the performance of the system during the preparation of a sample by mixing three liquids, the experiments are conducted for five different sampling volumes for each liquid between 50-250 μL . Herein, for instance, 50 μL from each liquid corresponds to a sample of 150 μL . During the preparation of the sample, first Liquid 1, then Liquid 2, and finally Liquid 3 is dosed to the container for each target sampling volume. Figure 9 reveals the results for five target sampling volumes where each color corresponds to a different liquid. It is seen from the figure that each liquid can be sampled accurately around the given reference value. The average deviations from the reference value are found as 1.9%, 2.8%, 3.4%, 3.4%, and 3.4% for 50, 100, 125, 200, and 250 μL target sampling volumes from each liquid, respectively. This implies that it is possible to prepare samples by the mixtures of three liquids is possible in different target sampling volumes with the proposed system. If we consider the maximum targeted sampling volume of 250 μL from each liquid, the average deviation becomes 3.4%. This means that there will be

approximately a 25 μL average deviation during the preparation of a sample with 750 μL .

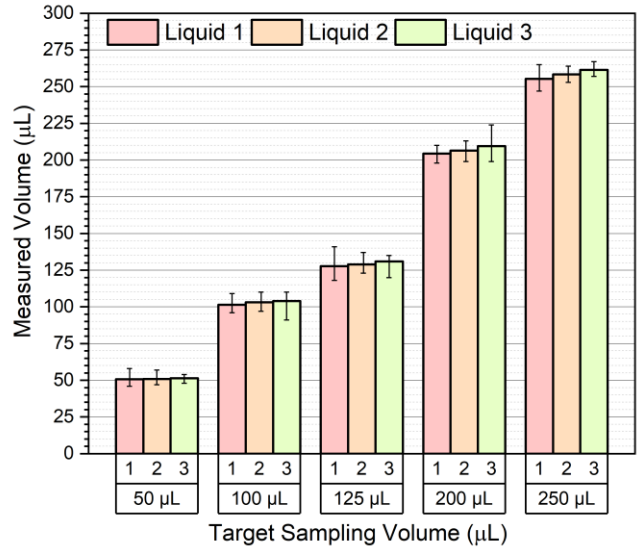


Figure 9. Dosing performance of the sample preparation with three different liquids. The sampling process is conducted by considering different volumes (50-250 μL) for each liquid. Error margins for each liquid and each target sampling volume are marked.

4. Conclusions

In this study, an automatic liquid dosing system is designed and tested for the preparation of samples in microliter-level volumes. For this target, a novel mechatronics system is designed and implemented with an application-specific algorithm. The following are the conclusions that can be drawn:

- The syringe can be positioned in the workspace with an error of around 1%.
- It is possible to conduct an accurate sampling process for a fixed volume. This case is tested for the lowest sampling volumes of 50 and 100 μL , and it is found that the highest average deviation is obtained for 100 μL in a 5x5 sample array as 3.9%.
- In terms of reproducibility, repetitive experiments are made for the lowest sampling volumes of 50 and 100 μL . In this experiment, it is obtained that up to 78% of the data is in the range of $\pm 5\%$ deviation range for a 100 μL sample in a 5x5 array.
- In the case of preparation of the samples with three different liquids, the highest average deviation is obtained when 250 μL is dosed from each liquid as 3.4%. This value decreases for the lower sampling volumes.

For future efforts, to increase the performance of the liquid intake process, mechanical design and the algorithm could be improved. Therefore, a possible bubble injection inside the syringes may be prevented. Moreover, a closed-loop control strategy could be implemented in the system to decrease the deviation from the reference volume and increase the precision of the sampling process.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

The authors of this article declare that this article does not require ethics committee approval. The authors also declare that

this article has no conflicts of interest with any individual or institution.

Acknowledgment

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey in the scope of 2209A Research Project Support for Undergraduate Students Commission (grant number: 1919B012217833).

Author Contribution Statement

Serkan Doğanay: Conceptualization, Literature review, Experimental design, Resources, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing. Kadri Emre Orgun: Literature review, Experimental design, Data collection, Writing – original draft. Ömer Yüce: Literature review, Experimental design, Data collection. Haydar Barış Öcal: Literature review, Experimental design, Data collection. Ayberk Killi: Literature review, Experimental design, Data collection.

References

- [1] Councill, E., Axtell, N.B., Truong, T., et al. 2021. Adapting a Low-Cost and Open-Source Commercial Pipetting Robot for Nanoliter Liquid Handling, *SLAS Technology*, Vol. 26, p. 311-319. DOI:10.1177/2472630320973591
- [2] Wu, Y.Q., Chen, H., Wang, W., He, N.Y., Liu B. 2016. Development and Validation of an Automated Liquid Handling System for Sample Preparation Based on Multichannel Air Displacement Pipetting Technology, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 16, p. 6867-6871. DOI:10.1166/jnn.2016.12597
- [3] Behrens, M.R., Fuller, H.C., Swist, E.R., Wu, J.W., Islam, M.M., Long, Z.C., Ruder, W.C., Steward, R. 2020. Open-source, 3D-printed Peristaltic Pumps for Small Volume Point-of-Care Liquid Handling, *Scientific Reports*, Vol. 10, p. 1543. DOI:10.1038/s41598-020-58246-6
- [4] Darling, C., Smith, D.A. 2021. Syringe Pump Extruder and Curing System for 3D Printing of Photopolymers, *HardwareX*, Vol. 9, p. e00175. DOI:10.1016/j.ohx.2021.e00175
- [5] Roth, E.A., Xu, T., Das, M., Gregory, C., Hickman, J.J., Boland, T. 2004. Inkjet Printing for High-throughput Cell Patterning, *Biomaterials*, Vol. 25, p. 3707-3715. DOI:10.1016/j.biomaterials.2003.10.052
- [6] Boppana, N.P.D., Snow, R.A., Simone, P.S., Emmert, G.L., Brown, M.A. 2023. Low-cost Automated Pipetting System Using a Single Board Computer and 3D-printing, *Instrumentation Science & Technology*, Vol. 51, p. 355-370. DOI:10.1080/10739149.2022.2129677
- [7] Kong, F.W., Yuan, L., Zheng, Y.F., Chen, W.D. 2012. Automatic Liquid Handling for Life Science: A Critical Review of the Current State of the Art, *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*, Vol. 17, p. 169-185. DOI:10.1177/2211068211435302
- [8] Tsai N.C., Sue C.Y. 2007. Review of MEMS-based drug delivery and dosing systems, *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 134, p. 555-564. DOI:10.1016/j.sna.2006.06.014
- [9] Tashman, J.W., Shiwerski, D.J., Feinberg, A.W. 2021. A High Performance Open-source Syringe Extruder Optimized for Extrusion and Retraction During FRESH 3D Bioprinting, *HardwareX*, Vol. 9, p. e00170. DOI:10.1016/j.ohx.2020.e00170
- [10] Englmann, M., Fekete, A., Gebefugi, I., Schmitt-Kopplin, P. 2007. The Dosage of Small Volumes for Chromatographic Quantifications Using a Drop-on-demand Dispenser System, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Vol. 388, p. 1109-1116. DOI:10.1007/s00216-007-1335-7
- [11] Cheng, S., Chandra, S. 2003. A Pneumatic Droplet-on-demand Generator, *Experiments in Fluids*, Vol. 34, p. 755-762. DOI:10.1007/s00348-003-0629-6
- [12] Achim, W. 2006. Acoustically driven programmable microfluidics for biological and chemical applications. *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*, Vol. 11, p. 399-405. DOI:10.1016/j.jala.2006.08.001
- [13] Lammerink, T.S.J., Elwenspoek, M., Fluitman, J.H.J. 1993. Integrated Micro-Liquid Dosing System. *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, February 10, Fort Lauderdale, 254-259. DOI:10.1109/MEMSYS.1993.296913
- [14] Wolfgang, S. 2004. PipeJet: A Simple Disposable Dispenser for the Nano- and Microliter Range, *SLAS Technology*, Vol. 9, p. 300-306. DOI:10.1016/j.jala.2004.08.008
- [15] Lake, J.R., Heyde, K.C., Ruder, W.C. 2017. Low-cost Feedback-controlled Syringe Pressure Pumps for Microfluidics Applications, *PLoS One*, Vol. 12, p. e0175089. DOI:10.1371/journal.pone.0175089
- [16] Carvalho, M.C., Murray, R.H. 2018. Osmar, the Open-source Microsyringe Autosampler, *HardwareX*, Vol. 3, p. 10-38. DOI:10.1016/j.ohx.2018.01.001
- [17] Samokhin, A.S. 2020. Syringe Pump Created Using 3D Printing Technology and Arduino Platform, *Journal of Analytical Chemistry*, Vol. 75, p. 416-421. DOI:10.1134/s1061934820030156
- [18] Florian, D.C., Odziomek, M., Ock, C.L., Chen, H.N., Guelcher, S.A. 2020. Principles of Computer-controlled Linear Motion Applied to an Open-source Affordable Liquid Handler for Automated Micropipetting, *Scientific Reports*, Vol. 10, p. 13663. DOI:10.1038/s41598-020-70465-5
- [19] Barthels, F., Barthels, U., Schwickert, M., Schirmeister, T. 2020. FINDUS: An Open-Source 3D Printable Liquid-Handling Workstation for Laboratory Automation in Life Sciences, *SLAS Technology*, Vol. 25, p. 190-199. DOI:10.1177/2472630319877374
- [20] Torres-Acosta, M.A., Lye, G.J., Dikicioglu, D. 2022. Automated Liquid-handling Operations for Robust, Resilient, and Efficient Bio-based Laboratory Practices, *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 188, p. 108713. DOI:10.1016/j.bej.2022.108713
- [21] Tweed, J.A., Gu, Z.H., Xu, H., Zhang, G.D., Nouri, P., Li, M., Steenwyk, R. 2010. Automated Sample Preparation for Regulated Bioanalysis: An Integrated Multiple Assay Extraction Platform Using Robotic Liquid Handling, *Bioanalysis*, Vol. 2, p. 1023-1040. DOI:10.4155/bio.10.55
- [22] Karimaghaee, P., Hosseinzadeh, A., Amidi, A., Roshandel, E. 2017. Adaptive Control Application on Syringe Pump Pressure Control Systems in Oil and Gas Industries. 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), November 21-23, Shiraz, 259-264. DOI:10.1109/ICCIAutom.2017.8258689
- [23] Cengel, Y., Cimbala, J. 2013. *Fluid mechanics fundamentals and applications (SI units)*. McGraw Hill, 1000s.
- [24] Panton, R.L. 2024. *Incompressible flow*. John Wiley & Sons, 867s.



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

Ant Colony Optimization and Beam-Ant Colony Optimization on Traveling Salesman Problem with Traffic Congestion

Trafik Sıkışıklığı Olan Gezgin Satıcı Probleminde Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Işın-Karınca Kolonisi Optimizasyonu

Mustafa Orçun Uslu ^{1*}, Kazım Erdoğan ²

¹ Yaşar University, Graduate School, Bornova, İzmir, TÜRKİYE

² Yaşar University, Department of Software Engineering, Bornova, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar*: orcunuslu6@gmail.com

Abstract

The Traveling Salesman Problem (TSP) is a well-known combinatorial optimization problem that has various implications in a variety of industries. Even the purest formulation of TSP has applications on from logistics routes to microchip manufacturing, unexpectedly, it can be used on DNA sequencing with slight modification as a sub-problem. In this paper, two versions of TSP were studied, a classical TSP and the TSP containing traffic congestion data. Two state-of-the-art solution methods were used, Ant Colony Optimization (ACO) and Beam-ACO. These algorithms were hybridized with 2-Opt local search and their performances compared on the same benchmark instances. The experimental results show the efficiency of Beam-ACO compared to ACO.

Keywords: Traveling Salesman Problem, Ant Colony Optimization, Beam-ACO, 2-Opt, Swarm Intelligence Optimization, Traffic Congestion

Öz

Gezgin Satıcı Problemi (GSP), çeşitli endüstrilerde çeşitli etkileri olan, iyi bilinen bir kombinatoriyal optimizasyon problemidir. GSP'nin en saf formülasyonu bile lojistik yollardan mikroçip üretimine kadar çeşitli uygulamalara sahiptir. Beklenmedik bir şekilde, bir alt problem olarak DNA dizilimi için küçük değişikliklerle kullanılabilir. Bu yazıda GSP'nin iki versiyonu incelenmiştir: klasik bir TSP ve trafik sıkışıklığı verilerini içeren GSP. Son teknoloji ürünü iki çözüm yöntemi kullanıldı: Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) ve Işın-KKO. Bu algoritmalar 2-Opt yerel arama ile hibritleştirildi ve performansları aynı kıyaslama örnekleriyle karşılaştırıldı. Deney sonuçları Işın-KKO'nun KKO'ya kıyasla verimliliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Gezgin Satıcı Problemi, Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Beam-KKO, 2-Opt, Sürü Zekası Optimizasyonu, Trafik Sıkışıklığı

1. Introduction

The Traveling Salesman Problem (TSP) is a challenging optimization problem in which a salesman must find the shortest tour that visits a set of cities exactly once and returns to the starting point [1].

The challenging part of the TSP is where the problem exponentially increases the computation cost. As the number of cities increases, the number of possible routes grows at a factorial rate, making exhaustive search impractical for larger instances. Furthermore, TSP is classified as NP-hard [2], implying that there is no known polynomial-time algorithm to find the optimal solution efficiently.

TSP has implications in a variety of industries. It helps businesses optimize their delivery routes, saving them time and money on fuel [3]. It assists in the design of effective machine routes in manufacturing [4], increasing production efficiency. Tourists employ TSP to plan itineraries that cover multiple attractions while minimizing travel time [5]. In network design, TSP can be used to determine the shortest cable layout in a network [6].

In real life, traffic is known to be a problem for everyone. It causes money and time loss as well as environmental damage and negative effects on human health [7]. The proposed algorithms try to solve this problem with a different version of TSP, created a simple model and called it "TSP with Traffic Congestion".

This paper combines the Beam Search algorithm with the Ant Colony Algorithm (ACO) and compares it with a standard Ant Colony Algorithm while adding an element to the problem as "Traffic between cities". While the ACO is one of the swarm intelligent methods that is inspired by real ant colonies and proposed by Marco Dorigo [8, 9]. The algorithm mimics real-life ants that try to find food source and return them to nest. The Beam Search Algorithm is a method used in many Natural Language Processing (NLP) and Speech Recognition Models for decision making. The algorithm is like a tree search algorithm with a scoring system where the highest score is to one that is decided on.

The Ant Colony Optimization (ACO) algorithm was proposed by Dorigo in 1992 in his PhD thesis [8]. His first algorithm aims to mimic an ant colony where an ant searches for a path between their colony and food source and this is used to search for an

optimal path in a graph. In his second paper [9], he applied this method to the Travelling Salesman Problem (TSP). His search proved that ACO had very promising results and encouraged to apply this method to other optimization problems.

In 1997, Dorigo improved his proposed algorithm and created a new algorithm called Ant Colony System (ACS)[10]. In this algorithm edge selection is biased towards favorability of the edge with its pheromone level. At the end of each iteration, only the best ant could update the global pheromone level.

In 2000, Stützle proposed the "Max-Min Ant System"(MMAS) [11] to overcome ACO's poor performance when the instance is large enough and demonstrated that ACO could be an effective solution for hard combinatorial optimization problems. In his paper, he proved that MMAS is currently the best-performing ACO algorithm for Quadratic Assignment Problem (QAP) and TSP.

Chu [12] proposed another approach to the ACO algorithm and added communication strategies to it in 2004. He called this algorithm Parallel Ant Colony Optimization (PACO). In the proposed algorithm, the population of ants is divided into multiple groups, and seven communication methods are applied to update the pheromone level between these groups. This method outperforms the previously proposed ACO algorithms.

To increase the efficiency and collaboration of the ants in searching the solution space, Hu and Li [13] proposed Continuous Orthogonal Ant Colony (COAC) algorithm by using an orthogonal design method where ants can explore the chosen domain more efficiently and accurately.

In order to find more accurate results in TSP, Gupta et al. [14] introduced a new algorithm called Recursive Ant Colony Optimization (RACO). Their algorithm divides the search space into multiple sub-spaces. After solving the TSP in these sub-spaces, RACO selects the best solutions for each sub-space and carries them to the next step. The algorithm runs until finds a solution, and every process mentioned above repeats itself.

The term Beam Search was first suggested by Reddy [15] in 1977. In 1987, Bisiani [16] implemented the Beam Search Algorithm as a combination of the best-first and breadth-first searches. It only searches for the best and prunes the tree which helps to reduce memory usage.

Blum [17] was the first person to use the Beam Search algorithm and ACO together to solve a Scheduling problem in 2005. He called this method "Beam-ACO" and proved that Beam-ACO is getting better results than standard ACO algorithms.

Proven that the Beam-ACO algorithm is better than the ACO algorithm, Caldeira et al. [18] applied this method to a supply chain management system. They have shown that Beam-ACO is always faster and better than ACO in supply chain problems. Although it's slower than ACO, Beam-ACO still had better results on logistic systems.

In 2008, Blum [19] applied Beam-ACO to the Simple Assembly Line Balancing (SALB) problem and showed that Beam-ACO gives the best solutions for the benchmark instances of the problem. He mentioned that Beam-ACO optimally solved the majority of the existing benchmark instances (SALB-1 problem). The solutions obtained for the rest of the instances by Beam-ACO were nearly optimal solutions.

In 2009, López-Ibáñez et al. [20] applied Beam-ACO on TSP with Time Windows (TSPTW) by replacing the bounding information in Beam-ACO by stochastic sampling. Based on their experimental results, they claim that their proposed algorithm was the state-of-the-art method for TSP.

In 2010, López-Ibáñez and Blum [21] improved their study [20] by implementing one-opt local search to it. Their results outperformed the results of the existing heuristic methods and were able to find good approximations in a much shorter time.

In 2017, Simões et al. [22] applied a hybridized Beam Search algorithm with a Population-based Ant Colony Optimization algorithm and called it Beam Search with Population-based Ant Colony Optimization (P-ACO). They applied P-ACO to a Multi-rendezvous Spacecraft Trajectory Optimization problem. The P-ACO algorithm had superior worst-case performance which might be the preferable choice for the practical applications.

In general, genetic algorithms (GA) are utilized in literature. In this paper, Beam-ACO and ACO are implemented and compared to each other. In addition, studied a different variation of TSP by adding the traffic congestion information to the TSP.

In Section 2, Materials and Methods are given by the formulation of the problems, explanations of the algorithms and their pseudo codes and their respected parameters. In Section 3, Experimental Results were laid out by explaining how the test cases are done, and giving the results in the figures and tables. Section 4 contains the Discussion, where the results and the performances of the two algorithms are compared. Section 5 includes the Conclusion and Future Work, in which the concluding remarks and future work for improvement are mentioned.

A combinatorial optimization problem known as the "Traveling Salesman Problem" (TSP) [1] [17] is defined as follows. There is a salesman who must travel to a given set of cities by visiting each city exactly once and returning to the initial city from which he or she began his or her tour. The goal of the salesman is to minimize the total distance (or cost) of this tour. Mathematically, TSP is a graph problem that searches for a Hamiltonian cycle on the given nodes (i.e. cities) that has the minimum total weight (i.e. total distance). The mathematical model is given below.

TSP is defined as a graph $G = (V, A)$ where V and A are the sets of cities and arcs between the cities, respectively. Let $d_{i,j}$ define the distance between the cities i and j . Then the TSP can be mathematically formulated as follows:

$$\text{minimize } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{i,j} x_{i,j} \tag{1}$$

Subject to

$$\sum_{i \in V, i \neq j} x_{i,j} = 1, \quad \forall j \in V \tag{2}$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} x_{i,j} = 1, \quad \forall i \in V \tag{3}$$

$$\sum_{i,j \in S, i \neq j} x_{i,j} \leq |S| - 1, \quad 2 \leq |S| \leq |V| \text{ and } \forall S \subset V \tag{4}$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if the path from } i \text{ to } j \text{ is in the tour} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

Equation (1) is the objective function of the TSP which aims to minimize the tour distance. Equations (2) – (5) are the constraints of the TSP. Equations (2) and (3) ensure that each city is visited by the salesman exactly once. Equation (4) eliminates the sub-tours in the TSP tour and Equation (5) is the decision variable for selecting the arcs in the tour.

In this paper, two types of TSP are studied. The first one is the classical TSP with the mathematical definition given above. We proposed a second type of TSP in addition to the classical TSP. We included traffic congestion information on each arc and updated the objective function with Equation (6). In the function, $c_{i,j}$ represents the traffic congestion unit which was randomly generated for each arc in the problem from the set $\{1,2,3,4,5\}$. Each value in the set represents the traffic density as “no traffic, less traffic, normal, semi-heavy traffic, and heavy traffic”, respectively.

$$\text{minimize } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{i,j} d_{i,j} x_{i,j} \quad (6)$$

2. Material and Methods

Since TSP is an NP-Hard problem, we used two well-known meta-heuristic methods to solve the TSP in this study. We both implemented the classical Ant Colony Optimization (ACO) algorithm and the Beam Search ACO, as known as the Beam-ACO algorithm.

ACO is a swarm intelligence method that was proposed by Marco Dorigo in 1992 in his PhD thesis [8]. ACO mimics the collective intelligent foraging behavior of ants. In the natural world, ants begin their exploration of food randomly. They leave pheromone hormones on the trails they traverse. Once they locate a food resource then they keep adding more pheromones on the path between the nest and the food. The pheromone hormones assist other ants to follow the same trail for the same food source. The shorter the distance between the food source and the nest the greater the amount of pheromone. This results in shortening the travel distances of the ants and directs the routes of the ants more intelligently. Nevertheless, the pheromones are volatile meaning it gradually evaporates in time. It means that more ant travels are needed on the same path to attract the other ants to follow that path. Consequently, the food sources that are farther away from the nest are less preferred by the ants. ACO simulates all this behavior in its search for the optimum tour for the TSP.

Beam search is a popular search algorithm in AI, particularly in natural language processing. It keeps track of a collection of potential sequences, building on an initial sequence by taking into account a variety of potential following moves. Each choice is given a likelihood score, and the highest-scoring sequences are kept while the others are pruned.

The beam-ACO algorithm takes these 2 algorithms and combines them. While the ant colony is working as usual, each and every ant runs the Beam Search algorithm to decide which city to go to next. When an ant is selecting the next city to move between unvisited cities, calculates their probability and distances. Then according to beam width, the amount of the best cities is selected among the unvisited cities. The ant will select the next city randomly within the selected cities, but the more probability the city has the more likely the ant will choose that city and vice versa.

2.1. Pseudocode of the Beam-Aco Algorithm

The GA procedure in this study is described below:

Initialize the Ant Population

Repeat

Construct the Tour of Each Ant

Evaluate Fitness Values of Each Ant Tour

Apply 2-Opt on Each Tour

Update Best Solution

Update Pheromone

Until (termination condition is satisfied)

Return Best Solution

2.2. Initialize the Ant Population

Several ants are randomly located at the cities in the initializing of the ant population. The initial pheromone amounts on each arc is set to 1. Every ant has a random path assigned by giving cities and shuffling them. By shuffling the path for each ant, the initial generation will have a uniformly distributed solution pool.

2.3. Constructing the Tour of Each Ant

Each ant starts moving from their first city to the next unvisited city and continues from the current city to next unvisited city until it finishes constructing its tour. Each unvisited city has a probability of selection. This probability is highly influenced by the pheromone amount on the arc to that city and the length of (and traffic congestion on) that arc. In this study, the probability of city selection is calculated as in [23]. The formula is given in Equation (7).

$$p_{i,j}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(t)^\alpha] [\eta_{i,j}(t)^\beta]}{\sum_{s \in allows_k} [\tau_{i,j}(t)^\alpha] [\eta_{i,j}(t)^\beta]}, & j \in allows \\ 0, & j \notin allows \end{cases} \quad (7)$$

where,

- $p_{i,j}^k(t)$ is the probability of selecting a city by ant k at time t
- $\tau_{i,j}(t)$ is the amount of pheromone on the arc between city i and j at time t
- $\eta_{i,j}(t)$ is the desirability of the arc between city i and j at time t (typically $1/d_{i,j}$)
- α is a parameter that controls the influence of $\tau_{i,j}$

β is a parameter that controls the influence of $\eta_{i,j}$

In the classical ACO algorithm, at each city, an ant decides the next unvisited city by considering the probabilities of all unvisited cities. Although this approach explores all the possible candidate cities, it is a time and memory-consuming process. Beam-ACO speeds up and saves up from memory by limiting the choice of the ants in a beam width. Beam width is a predefined number that limits the unvisited city pool. Beam includes the number of cities according to Beam Width. The probabilities (Eq. 7) of each city are calculated beforehand, and the cities that have the best probabilities are selected for the beam. Within the selected unvisited cities, the city is selected randomly but the more probability the city has, the more likely the ant chooses it as the next city. The beam search procedure in this study is described below:

Beam Search

- Calculate Probabilities of Each City
- Get Cities with Best Probabilities [Beam Width]
- Choose Next City Randomly According to Probability Ratio

2.4. Evaluate Fitness Values of Each Ant Tour

Once the ant tours are constructed, the fitness values of each tour is also calculated. To calculate fitness values of each solution, Equation (1) is used for the classical TSP scenario and Equation (6) is used for TSP with traffic congestion scenario.

2.5. Apply 2-Opt on Each Tour

The current solutions obtained by the ants are improved by 2-Opt. This algorithm was proposed by Croes [24]. 2-Opt local search is a well-known and often used local search heuristic, especially in permutation-based optimization problems such as TSP. In 2-Opt method, two connection points (or edges in TSP) in the permutation are successively broken and cross-connected with the aim of reducing the fitness of the solution (i.e. total distance or cost of the tour). If the new permutation's fitness is better than the current one then the original permutation is replaced by the new permutation; otherwise, it remains unchanged. 2-Opt repeats this process consecutively on each edge in the tour and results in finding the best permutation possible on the ant tour.

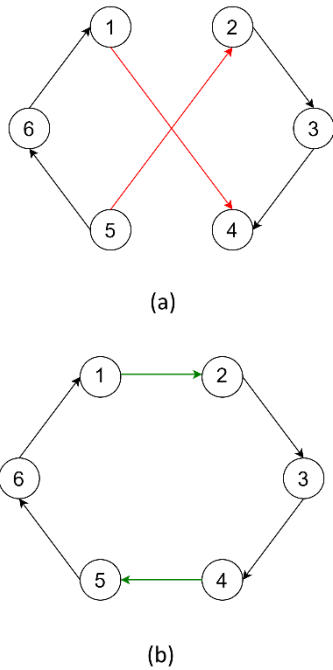


Figure 1. 2-Opt Local Search

In Fig. 1, the breaking and cross-connection of edges of a tour in 2-Opt local search algorithm is represented. Cities are shown in circles with their indices. Directed arrows demonstrate the order of the city sequence in the tour, and the lengths of these arrows represent the distance between 2 cities. In the first diagram (a) of Fig. 1, the path that an ant follows is changed by breaking the connections between city 1 and 4, and the cities between 2 and 5. Then, city 1 is connected to city 2, and city 4 is connected to city 5. This way the total distance of the ant's tour is decreased, which

in turn, improves the fitness of the solution obtained by that ant. This breaking and cross-connecting process is repeatedly applied to all edges of the tour, until there is no improvement occur on the total distance. In the end, 2-Opt returns the tour with the best fitness that is found for the given tour.

2.6. Update Best Solution

After applying 2-Opt on each ant tour, the current best solution is updated according to these newly obtained tours. The solution with the best fitness value is assigned as the new best solution.

2.7. Update Pheromone

The final step in a generation of Beam-ACO is updating the amount of pheromones on each arc. In other words, some amount of pheromone evaporates before the next generation of ant moves. This pheromone update is done with Equation 8.

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\tau_{i,j} + \Delta \tau_{i,j} \tag{8}$$

where,

- $\tau_{i,j}$ is the amount of pheromone on the arc between the cities i and j
- ρ is the rate of pheromone evaporation
- $\Delta \tau_{i,j}$ is the amount of pheromone deposited, typically given by

$$\Delta \tau_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{1}{L_k}, & \text{if ant } k \text{ travels on the arc between } i \text{ and } j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{9}$$

where L_k is the distance of the k^{th} ant's tour.

2.8. Termination Criteria

In our study, our Beam-ACO algorithm terminates either when it finds the known optimal solution in literature for the related problem instance or when it runs predefined number of generations. In the latter case the overall best solution of all generations is the result of Beam-ACO.

2.9. Beam-Aco Parameters

The values of the parameters in pheromone calculations and updates in the Beam-ACO used in this paper are adapted from the study [15]. The ant population size, beam width and iteration size values are determined by an experimental study done on one of the TSP instances used in this study which is "ch150.tsp". The values of these parameters that yielded to best results are given in Table 1 below. Same parameters and values are also used for ACO.

Table 1. Beam-ACO Parameters

Parameter	Value
m : number of ants in the Beam-ACO population	200
α : pheromone factor	1
β : heuristic function factor	5
Q : pheromone constant	100
ρ : evaporation rate	0.5
bw : beam width.	30% of n (n is the number of the cities)

N : maximum number of iterations of Beam-ACO	100
--	-----

3. Experimental Results

The ACO and Beam-ACO algorithms used in this study are coded in Java programming language on a laptop computer with i7 processor and 16 GB RAM. The graphics of the best results are coded in Python programming language.

Four well-known TSP instances were selected in the experimental studies: berlin52.tsp, ch130.tsp, ch150.tsp, a280.tsp. These instances can be found at <http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/tsp/>. The numbers on the files are represent the number of the cities that instance contains.

Two scenarios of the TSP were taken into consideration: classical TSP and TSP with traffic congestion. For each scenario, each instance was run 30 times for each ACO and Beam-ACO algorithms.

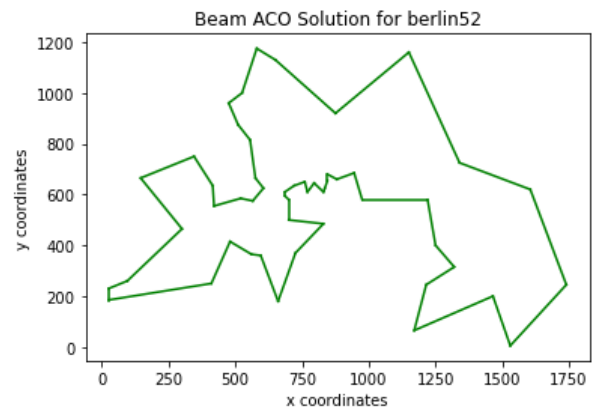
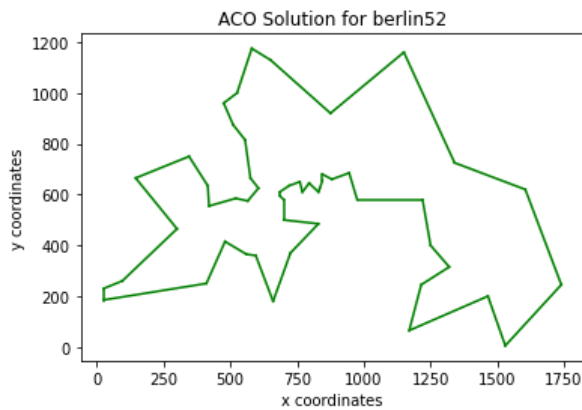
In the first scenario, the performances of ACO and Beam-ACO algorithms were compared against each other and the optimum distances known in TSP literature for the related instance. Table 2 contains the experimental results of the first scenario. In Table 2, n is the number of cities that the instances have and provided. Literature Optimum values are obtained from TSPLIB95 at <http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/tsp/>. ACO and Beam-ACO best values are calculated according to equation (1) in Table 2 and equation (6) in Table 3.

Table 2. The performances of ACO and Beam-ACO for classical TSP

Instance	n	Literature Optimum	ACO Best	ACO's Convergence to the Optimum	Beam-ACO Best	Beam-ACO's Convergence to the Optimum	ACO Average	Beam-ACO Average
berlin52	52	7542	7542	0.000%	7542	0.000%	7542	7542
ch130	130	6110	6144	0.556%	6144	0.556%	6167.8	6165.43
ch150	150	6528	6544	0.245%	6540	0.184%	6577.56	6579
a280	280	2580	2649	2.674%	2647	2.597%	2674.5	2672.8

ACO and Beam-ACO could find optimum values of berlin52.tsp instance. They, however, could not perform the same success on the other three instances. It is because, as the number of cities increases, the search space expands exponentially. On the other hand, while both ACO and Beam-ACO found the same best value

for the ch130.tsp instance, Beam-ACO outperformed ACO with regards to its convergence to the optimum values for the other two instances, ch150.tsp and a280.tsp. Figure 2 shows the graphical results of both ACO's and Beam-ACO's best solutions in Euclidean space for the first scenario.



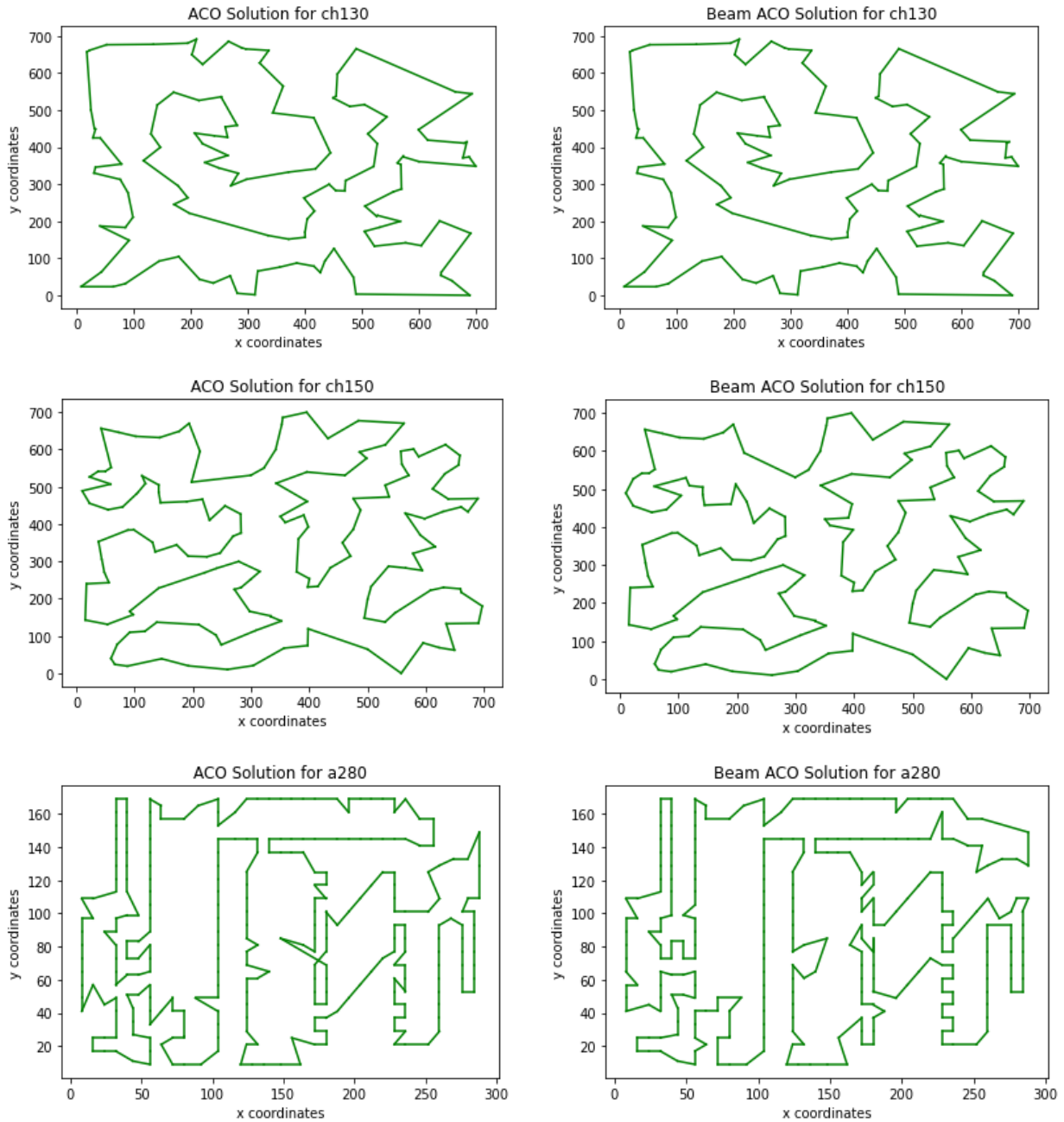


Figure 2. The graphics of ACO and Beam-ACO result in Euclidean space for the first scenario

The second scenario includes the traffic congestion information on the arcs between each city. This information consists of numbers from 1 to 5 representing the intense of traffic on that arc. Each color in Figure corresponds to the density of traffic congestion such as “no traffic, less traffic, normal, semi-heavy traffic, and heavy traffic” with colors “1-lime, 2-turquoise, 3-gold, 4-red, 5-brown” respectively. These values are randomly assigned for each instance. To the best of our knowledge, this is

the first study that proposed a TSP model which includes traffic congestion information on the arcs in the selected TSP instances and that the ACO and Beam-ACO algorithms are applied on such a setup. Since the optimum values for this TSP model do not exist in literature, the performances of ACO and Beam-ACO algorithms in this second scenario were compared against each other. Table 3 contains the experimental results of the second scenario.

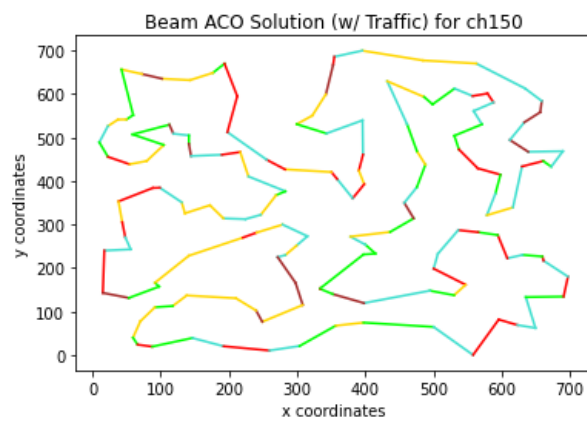
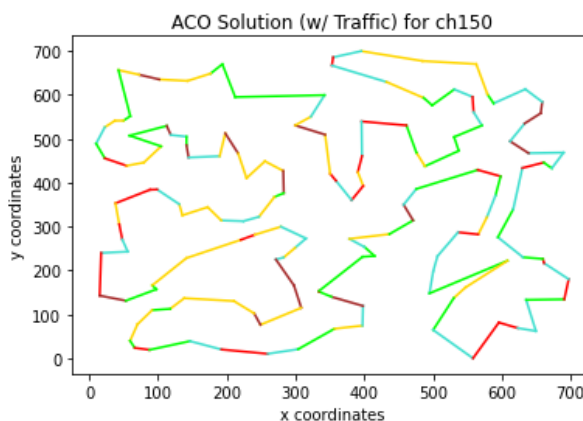
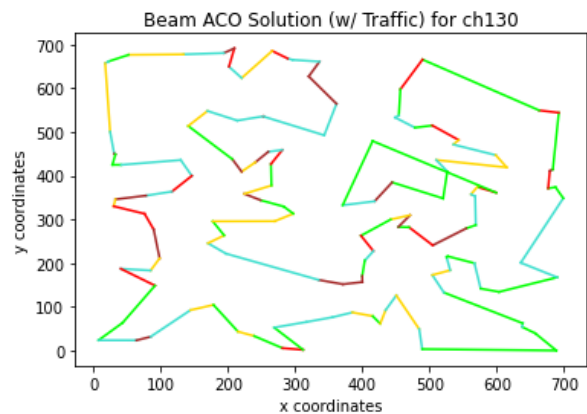
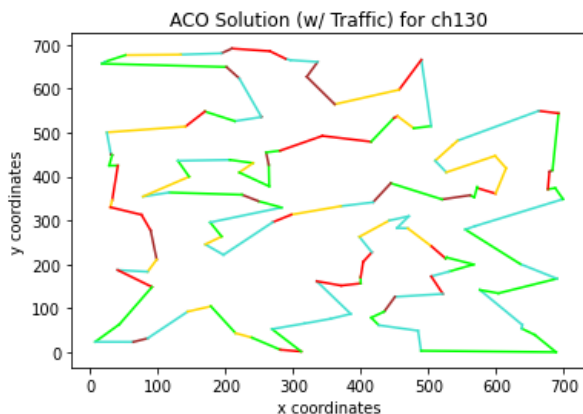
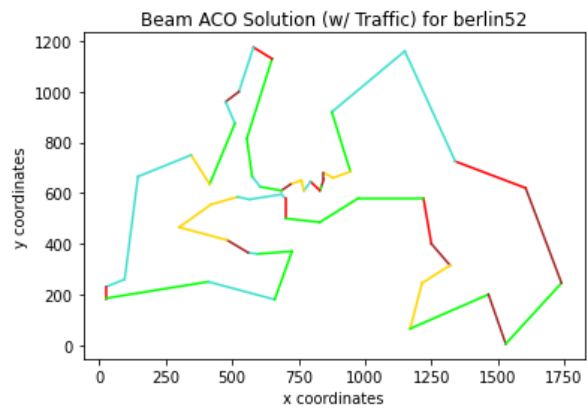
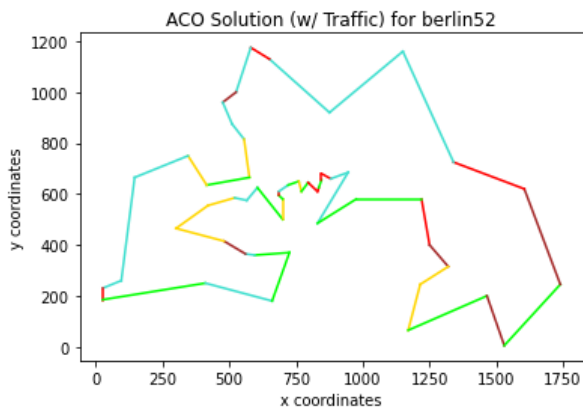
Table 3. The performances of ACO and Beam-ACO for the TSP model that includes traffic congestion

Instance	n	ACO Best	Beam-ACO Best	ACO Average	Beam-ACO Average
berlin52	52	18942	18786	19156.2	19117.1
ch130	130	15191	14953	15524.6	15516.2

ch150	150	17583	17545	17955.1	17883
a280	280	7472	7562	7677.1	7704.46

As the result shows in Table 3, Beam-ACO algorithm has a better performance on the majority of the instances both in best and average optimum values. ACO has better results on a280.tsp because as it is seen in the figures, some of the location has multiple option with exact same distance which is challenging for the algorithms. Adding traffic levels to the process, solving the TSP become harder since the objective function of this new TSP model contains travel times along with distances on each path. Both ACO and Beam-ACO algorithms try to find the fastest path

to complete TSP while avoiding high-level traffic on the path. As it is seen in Figure 3 below, ACO and Beam-ACO aim to minimize the selection of high distance and traffic paths. The chosen high traffic paths are mostly short distances that can be travelled faster. Since Beam-ACO is utilizing the Beam Search Algorithm for selecting the next city to move, it has better results than ACO in general. Figure 3 shows the graphical results of both ACO's and Beam-ACO's best solutions in Euclidean space for the second scenario.



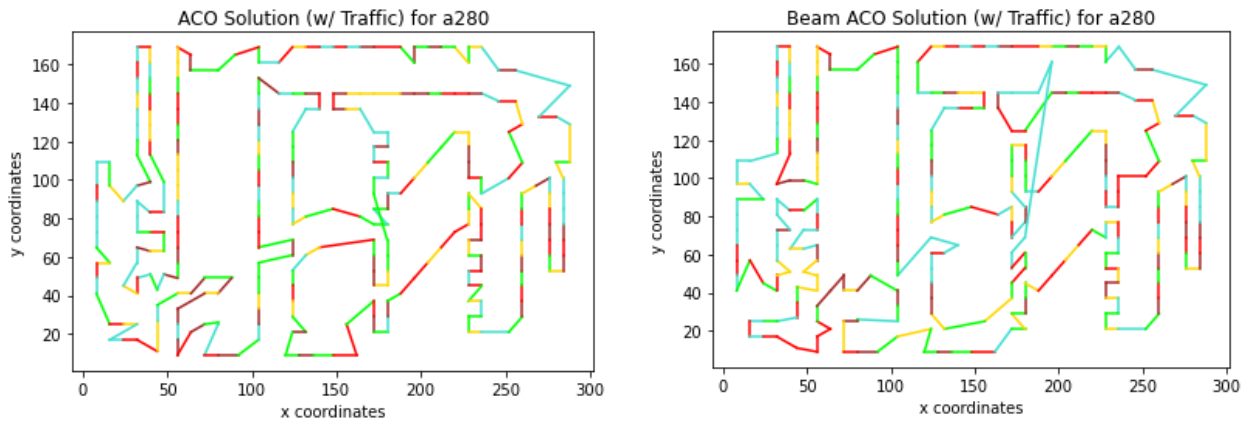


Figure 3. The graphics of ACO and Beam-ACO results in Euclidean space for the second scenario

4. Discussions

For the classical TSP version studied in this paper, the literature optimum values for the berlin52.tsp instance was found by ACO and Beam-ACO as seen in Table 2. However, these two algorithms could not perform the same success for other instances. It's because the search space grows exponentially with the number of cities. While both algorithms found the same best value for the ch130.tsp instance, in terms of convergence to the optimal values for the other two instances of ch150.tsp and a280.tsp, Beam-ACO performed better than ACO.

For the TSP with traffic congestion version of the experimental results as shown in Table 3, the Beam-ACO algorithm performs better than ACO in terms of both average and best values for the majority of instances. When traffic levels are added to the equation, the TSP becomes more difficult to solve since the new TSP model's objective function includes travel times and path lengths. To find the fastest route, both algorithms avoid high-level traffic paths. It's visible in Figure 3, both algorithms are avoiding such path and the chosen high-level traffic paths are mostly short distances. Beam-ACO has better results in general because in the city selection process, Beam-Search performed better search than classical ACO.

5. Conclusions and Future Work

In this study, a TSP was studied with two versions. The first version is the classical TSP while the second one includes traffic congestion data on the arcs of the classical one. As solution methods, we used state-of-the-art ACO and Beam-ACO enhanced by 2-Opt local search heuristic. The experimental studies of this paper indicate that Beam-ACO performed more successful results than ACO in both TSP versions on the same problem instances.

The main contribution of this paper is to proposing a TSP version with traffic congestion data and comparing the performance of two state-of-the-art swarm intelligent optimization methods, i.e. ACO and Beam-ACO. This version of TSP brings a new dimension to the conventional TSP by changing the objective of the problem from distance minimization to travel time minimization of the salesman.

As a future work, the proposed TSP model can be modified by replacing the randomly generated traffic congestion values with real-life case scenarios. This real-life data can even be arranged dynamically, that is, the traffic congestion data may vary in time as the salesman travels his or her tour.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

The prepared article does not require ethical committee approval. There is no conflict of interest with any person or institution in the prepared article.

Author Contribution Statement

Mustafa Orçun Uslu made contributions in coding the main algorithms, running the experimental studies, and writing of the article. Kazım Erdoğan made contributions in developing the model, coding the heuristics, improvement of the parameters, writing and proof reading the article.

References

- [1] G. Laporte, "The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms," *European Journal of Operational Research*, vol. 59, no. 2, pp. 231–247, Jun. 1992, doi: 10.1016/0377-2217(92)90138-Y.
- [2] S. H. Rubin, T. Bouabana-Tebibel, Y. Hoadjli, and Z. Ghalem, "Reusing the NP-Hard Traveling-Salesman Problem to Demonstrate That P~NP (Invited Paper)," in 2016 IEEE 17th International Conference on Information Reuse and Integration (IRI), Pittsburgh, PA, USA: IEEE, Jul. 2016, pp. 574–581. doi: 10.1109/IRI.2016.84.
- [3] Y. S. Chang and H. J. Lee, "Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route," *Expert Systems with Applications*, vol. 104, pp. 307–317, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.eswa.2018.03.032.
- [4] C. H. Cheng, Y. P. Gupta, W. H. Lee, and K. F. Wong, "A TSP-based heuristic for forming machine groups and part families," *International Journal of Production Research*, vol. 36, no. 5, pp. 1325–1337, May 1998, doi: 10.1080/002075498193345.
- [5] V. Shinkarenko, S. Nezdoyminov, S. Galasyuk, and L. Shynkarenko, "Optimization of the tourist route by solving the problem of a salesman," *Journ. Geol., Geogr., and Geoecon.*, vol. 29, no. 3, pp. 572–579, Oct. 2020, doi: 10.15421/112052.
- [6] E. Duman, M. H. Ozcelik, and A. N. Ceranoglu, "A TSP (1,2) application arising in cable assembly shops," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56, no. 6, pp. 642–648, Jun. 2005, doi: 10.1057/palgrave.jors.2601850.
- [7] A. Meijer, M. A. J. Huijbregts, E. Hertwich, and L. Reijnders, "Including human health damages due to road traffic in life cycle assessment of dwellings," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11, pp. 64–71, Apr. 2006, doi: 10.1065/lca2006.04.013.
- [8] A. Colnari, M. Dorigo, and V. Maniezzo, "An Investigation of Some Properties of an Ant Algorithm," in *PARALLEL PROBLEM SOLVING FROM NATURE*, 2, R. Manner and B. Manderick, Eds., Amsterdam: Elsevier Science Publ B V, 1992, pp. 509–520. Accessed: Nov. 20, 2023. [Online]. Available: [https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:A1992BX92H00051\(overlay:export/exp\)](https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:A1992BX92H00051(overlay:export/exp))
- [9] A. Colnari, M. Dorigo, and V. Maniezzo, "Distributed Optimization by Ant Colonies," in *TOWARD A PRACTICE OF AUTONOMOUS SYSTEMS: PROCEEDINGS OF THE FIRST EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE*, F. Varela and P. Bourguine, Eds., Cambridge: MIT Press, 1992, pp. 134–142. Accessed: Nov. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:A1992BW87V00017>

- [10] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, Apr. 1997, doi: 10.1109/4235.585892.
- [11] "MAX-MIN Ant System - ScienceDirect." Accessed: Nov. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X0000431?via%3Dihub>
- [12] S.-C. Chu, J. F. Roddick, and J.-S. Pan, "Ant colony system with communication strategies," *Information Sciences*, vol. 167, no. 1, pp. 63–76, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.ins.2003.10.013.
- [13] X.-M. Hu, J. Zhang, and Y. Li, "Orthogonal Methods Based Ant Colony Search for Solving Continuous Optimization Problems," *J. Comput. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 2–18, Jan. 2008, doi: 10.1007/s11390-008-9111-5.
- [14] D. K. Gupta, Y. Arora, U. K. Singh, and J. P. Gupta, "Recursive Ant Colony Optimization for estimation of parameters of a function," in *2012 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, Mar. 2012, pp. 448–454. doi: 10.1109/RAIT.2012.6194620.
- [15] "Speech Understanding Systems. Summary of Results of the Five-Year Research Effort at Carnegie-Mellon University." Accessed: Dec. 21, 2023. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA049288>
- [16] R. Bisiani, "Beam search," *Encyclopedia of Artificial Intelligence*. Wiley & Sons, pp. 56–58, 1987.
- [17] C. Blum, "Beam-ACO—hybridizing ant colony optimization with beam search: an application to open shop scheduling," *Computers & Operations Research*, vol. 32, no. 6, pp. 1565–1591, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.cor.2003.11.018.
- [18] J. L. Caldeira, R. C. Azevedo, C. A. Silva, and J. M. C. Sousa, "Supply-Chain Management Using ACO and Beam-ACO Algorithms," in *2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference*, Jul. 2007, pp. 1–6. doi: 10.1109/FUZZY.2007.4295615.
- [19] C. Blum, "Beam-ACO for Simple Assembly Line Balancing," *INFORMS J. Comput.*, vol. 20, no. 4, pp. 618–627, FAL 2008, doi: 10.1287/ijoc.1080.0271.
- [20] M. Lopez-Ibanez, C. Blum, D. Thiruvady, A. T. Ernst, and B. Meyer, "Beam-ACO Based on Stochastic Sampling for Makespan Optimization Concerning the TSP with Time Windows," in *EVOLUTIONARY COMPUTATION IN COMBINATORIAL OPTIMIZATION, PROCEEDINGS*, C. Cotta and P. Crowling, Eds., Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2009, pp. 97–+. Accessed: Nov. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000265680900009>
- [21] M. López-Ibáñez and C. Blum, "Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows," *Computers & Operations Research*, vol. 37, no. 9, pp. 1570–1583, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.cor.2009.11.015.
- [22] L. F. Simões, D. Izzo, E. Haasdijk, and A. E. Eiben, "Multi-rendezvous Spacecraft Trajectory Optimization with Beam P-ACO," in *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, B. Hu and M. López-Ibáñez, Eds., in *Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 141–156. doi: 10.1007/978-3-319-55453-2_10.
- [23] [T. Fei et al., "Research on improved ant colony optimization for traveling salesman problem," *MBE*, vol. 19, no. 8, pp. 8152–8186, 2022, doi: 10.3934/mbe.2022381.
- [24] G. A. Croes, "A Method for Solving Traveling-Salesman Problems," *Operations Research*, vol. 6, no. 6, pp. 791–812, Dec. 1958, doi: 10.1287/opre.6.6.791.

<http://web.deu.edu.tr/fmd>

E-ISSN 2547-958X



9 771302 930005 >