



Dicle Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

**mühendislikdergisi**  
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
**mühendislikdergisi**  
Cilt: 13, Sayı: 4, Aralık 2022 ISSN: 1309-8640

**Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner**  
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

**Baş Editör / Editor-in-Chief**  
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

**Alan Editörleri / Field Editors**  
İdris BEDİRHANOĞLU  
Atilla Gencer DEVECİOĞLU  
Abdulkadir ALBAYRAK  
Erhan ÇETİN

**Tasarım-Dizgi / Designing-Editing**  
Mesut ŞEKER

**Yazışma Adresi**

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,  
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır  
Telefon : +90-412 241 10 00 (Dahili: 3637)  
Elektronik posta : [muhendislikdergisi@dicle.edu.tr](mailto:muhendislikdergisi@dicle.edu.tr)  
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>, <https://duje.dicle.edu.tr/journal/>

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309-8640  
Online ISSN: 2146-4391

## Hakem Listesi / Reviewers List

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

*We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.*

- Saed MOGHİMİ (İstanbul Aydın Üniversitesi)  
Müberra ESER AYDEMİR (İstanbul Aydın Üniversitesi)  
Erkan BOZKURTOĞLU (ITU)  
Hüseyin Suha AKSOY (Fırat Üniversitesi)  
İhsan TUĞAL (Muş Alparslan Üniversitesi)  
Abdurrahman ÖZBEYAZ (Adıyaman Üniversitesi)  
Hakan ÜSTÜNEL (Kırklareli Üniversitesi)  
Kemal SAPLIOĞLU (Süleyman Demirel Üniversitesi)  
Hasan Törehan BABACAN (Amasya Üniversitesi)  
Tayfun ABUT (Muş Alparslan Üniversitesi)  
Ahmet ELBİR (YTU)  
Fatih ÖZKAYNAK (Fırat Üniversitesi)  
Ebru ERİŞ (Ege Üniversitesi)  
Pınar DEMİRCİOĞLU (Aydın Adnan Menderes Üniversitesi)  
Murat GÜL (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)  
Ahmet ÖZBEK (Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi)  
Ömer TÜRK (Mardin Artuklu Üniversitesi)  
Hasan POLAT (Bingöl Üniversitesi)  
Mesut HÜSEYİNOĞLU (DU)  
Nizamettin HAMİDİ (DU)  
Sedat BİNGÖL (DU)

# İçindekiler / *Table of Contents*

## Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- A brain-computer interface for gamification in the Metaverse (Research Article)  
**Yaşar Daşdemir** 645
- Data division effect on machine learning performance for prediction of streamflow (Research Article)  
**Okan Mert Katipoğlu** 653
- Investigation of Slime Mould Algorithm and Hybrid Slime Mould Algorithms' Performance in Global Optimization Problems (Research Article)  
**Osman Altay, Elif Varol Altay** 661
- Automated Detection of Alzheimer's Disease using raw EEG time series via. DWT-CNN model (Research Article)  
**Mesut Şeker, Mehmet Sıraç Özerdem** 673
- Utilizing the Ensemble of Deep Learning Approaches to Identify Monkeypox Disease (Research Article)  
**Sedat Örenç, Emrullah Acar, Mehmet Sıraç Özerdem** 685

## Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

- Effect of Fibre Orientation and Loading Direction on The Compressive Response of E-Glass/Epoxy Laminated Composites Used in Modern Helicopter Blades (Research Article)  
**Abdullah Çelik, Yusuf Arman** 693
- Sabit Hız İle Yörünge Takibi Sağlayan Dört Çubuk Mekanizmasının Hız Kontrolü (Araştırma Makalesi)  
*Speed Control of Four-Bar Mechanism Providing Trajectory Tracking with Constant Velocity (Research Article)*  
**Halit Hülako, Orhan Çakar** 701
- Farklı Eğimlerdeki Bantlı Konveyörlerde Kapasitenin Ayrık Elemanlar Metoduyla (DEM) İncelenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of the Conveyor Capacity in Different Angle Belt Conveyors with Discrete Element Method (DEM) (Research Article)*  
**Enes Sezer, Berna Bolat, Birgül Aşçıoğlu Temiztaş** 709

## Maden Mühendisliği / Mining Engineering

- One pier with two stones: A case study on different stones used in the foundation of a Roman bridge on the Batman Stream, Turkey (Research Article)  
**Felat Dursun, F. Meral Halifeoğlu** 715

## İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- Geosentetik Takviyeli Kum Kazıkları ile Güçlendirilen Yumuşak Kil Zeminlerin Düşey Yer Değişirme Davranışının Değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)  
*Evaluation of Vertical Displacement Behavior of Soft Clay Soils Reinforced with Geosynthetic Reinforced Sand Piles (Research Article)*  
**Kaveh Dehghanian, Serpil Erden** **723**
- İzmit Körfez Geçiş Köprüsü (Osman Gazi Köprüsü) Hersek Burnu ayağı kuru havuz inşaatında zemin ve jeoteknik tasarım parametrelerinin korelasyon yöntemleriyle belirlenmesi sonucu karşılaşılan sorunlar (Araştırma Makalesi)  
*Problems encountered as a result of the determination of soil and geotechnical design parameters by correlation methods in the construction of the Izmit Bay Crossing Bridge (Osman Gazi Bridge) Hersek foot dry dock construction (Research Article)*  
**Mehmet İnce, Ahmet Karakaş, Özkan Coruk** **731**
- Sürdürülebilir kent yönetimi ve yeşil altyapı kavramı kapsamında çevreci yaklaşımlar: İskenderun örneği (Araştırma Makalesi)  
*Environmental approaches within the concept of sustainable urban management and green infrastructure: A case study in Iskenderun (Research Article)*  
**Talip Turna, Alper Solmaz** **739**
- Barajların deşarj yapılarındaki akış karakteristikleri ve enerji kırıcı yapıların etkinliğinin sayısal analizi (Araştırma Makalesi)  
*Numerical analysis of the efficiency of flow characteristics in the discharge and energy dissipators structures of dams (Research Article)*  
**Selman Oğraş, Fevzi Önen** **749**

---

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılabilirliği konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.



## A brain-computer interface for gamification in the Metaverse

Yaşar DAŞDEMİR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Erzurum Technical University, Computer Engineering Department, yasar.dasdemir@erzurum.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9141-0229

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 22 June 2022  
Received in revised form 14  
October 2022  
Accepted 24 November 2022  
Available online 31 December 2022

#### Keywords:

Metaverse, locomotion, teleport,  
EEG, gamification, BCI

Doi: 10.24012/dumf.1134296

\* Corresponding author

### ABSTRACT

This study contributes to our understanding of the Metaverse by presenting a case study of the implementation of brain-computer interface supported game-based engagement in a Virtual Environment (VE). In VE, individuals can communicate with anyone, anywhere, anytime, without any limits. This situation will increase the barrier-free living standards of disabled people in a more accessible environment. A virtual world of well-being awaits these individuals, primarily through gamified applications thanks to Brain-Computer Interfaces. Virtual environments in the Metaverse can be infinitely large, but the user's movement in a virtual reality (VR) environment is constrained by the natural environment. Locomotion has become a popular motion interface as it allows for full exploration of VE. In this study, the teleport method from locomotion methods was used. To teleport, the user selects the intended location using brain signals before being instantly transported to that location. Brain signals were decomposed into alpha, beta, and gamma bands. The features of each band signal in Time, frequency, and time-frequency domains were extracted. In this proposed method, the highest performance of binary classification was obtained in the frequency domain and the Alpha band. Signals in the alpha band were tested in the Time, Frequency, and Time-Frequency domains. Teleport operations are faster in the time domain and more stable in the frequency domain. However, the Hilbert-Huang Transform (HHT) method using in the Time-Frequency domain could not respond adequately to real-time applications. All these analyses were experienced in the Erzurum Virtual Tour case study, which was prepared to promote cultural heritage for the gamification method.

## Introduction

Metaverse provides a virtual environment to experiment, practice, and learn without the costly consequences of doing them in the real world. The Virtual Reality (VR) industry, which will enable us to enter this virtual world, is overgrowing as more powerful and versatile Head-Mounted Displays (HMD) and VR peripherals are developed. That's why technology-based companies are turning their attention to immersive VR as a strategic opportunity. So recognizing in the rapid growth and interest in the Metaverse, this study presented an exemplary study by analyzing VR research in BCI and related fields. Thus, the pros and cons of technologies such as Metaverse, Virtual Reality, Gamification, and Brain-Computer Interfaces in human life were investigated and the place of BCI in Metaverse was mentioned.

The Metaverse is a virtual world that users can experience from a first-person perspective. It can also be considered a navigable internet or social media platform. The Metaverse gained immense popularity after Facebook changed its name to Meta. Especially after the statement made by Mark Zuckerberg in 2021, everyone started to wonder what this technology is when it would come and what it includes.

The challenges of the Metaverse include sustainability, hardware and software constraints, difficulty in developing and preparing content, and cyber nuisances. The sustainability of Metaverse is essential. Because if the world population is kept at a certain level, it can grow and solve problems, but the world cannot be sustained when the number of users accessing the Metaverse decreases. Using episodic memory that effectively manages people's daily activities allows the user to feel the comfort and advantage of accessing the Metaverse for a long time. Storing all experiences in memory has usage and capacity limitations. Therefore, memory research is needed to find and reuse important parts effectively.

While the Metaverse is very similar to the real world in terms of sensors in hardware, some sensations are better felt in real life (e.g., daylight, smell, sticky, slippery, wind). However, as the program becomes more complex, it faces the limit of sophistication in a complex application. For example, if modals such as scent [1] are added to BCI applications, the immersive of the systems will increase even more.

Another challenge is the development phase. From a metaverse development perspective, there are very few online resources, especially for beginner developers. There

is not enough information with practical details to make complex and realistic applications (e.g., object selection, conditional actions, user storyboards with scene flow, teleport-teleport between scenes, motion, and dialogue). Therefore, an individual developer must develop a standard system (i.e., a platform and a community of developers) together without designing the entire system. As for the framework, consider a commercial platform with proper maintenance (e.g., Roblox) and an open source-based platform with various possibilities (e.g., Unity3D).

Langbehn et al. [2] analyzed different methods of locomotion: Joystick, Teleport, and Redirected Walking. They conclude that Redirected Walking provides better spatial recognition compared to the other two. They also indicate that the Joystick is the locomotion method that produces more cybersickness. In this study, the participants did not observe cybersickness (such as dizziness and nausea) since locomotion was performed with direct brain signals. The negativities brought about by locomotion movements are somewhat eliminated by BCI applications.

#### A. Metaverse tools (AR, VR, MR, XR)

Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) were among the top ten emerging technologies in 2020. It is expected to be among the best developing technologies of 2021 in the field of information technologies. These systems, which have been widely used in education, training, entertainment, and marketing, and even in post-injury rehabilitation centers, have attracted the attention of the game industry.

With the growing popularity in VR and the introduction of new devices at relatively lower costs, more video games have been developed in this area recently. Most of these games provide a more natural and immersive environment with an HMD while also using more first-person interaction techniques.

It is essential to understand better the factors that promote learning through games. Therefore, VR offers new possibilities in education and vocational training. VR excels when real education is too expensive, and some lab applications are too dangerous.

In the VR environment, players often experience the feeling of "being there". This feeling is sometimes expressed with the concepts of "presence" and "immersive" for VR, which are used interchangeably.

In Figure 1, Milgram [3] presents descriptive terminology. Researches in different disciplines such as AR, Mixed Reality (MR), and Augmented Virtuality (AV) are classified.

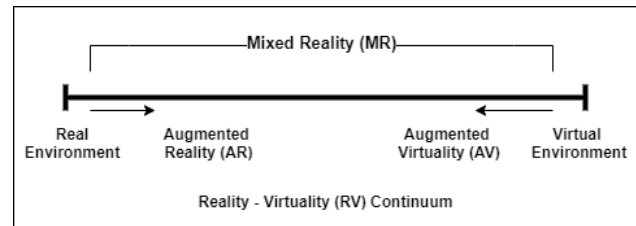


Figure 1. Augmented Reality in the Reality-Virtuality continuum (adapted from [3])

Burdea and Coiffet [4] define virtual reality with the "Virtual Reality Triangle ( $I^3$ )": Immersion, Interaction, and Imagination (Figure 2).

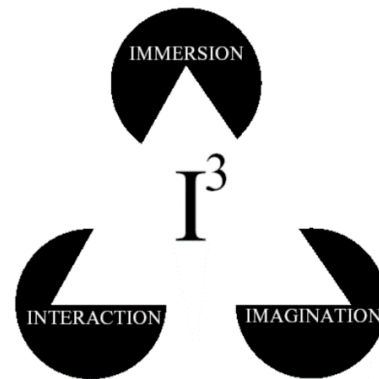


Figure 2. Virtual Reality Triangle

**Immersion:** This concept defines the immersive, inclusive, and inclusive effects of the virtually created world environment. This definition is divided into two subclasses: Mental and Physical Immersive. These two concepts are essential for the player to have a successful personal experience in the VR environment. Mental immersion shows the emotional state of the player and shows that he has deep anxiety and tension in the game. With its physically immersive feature, the actor shapes his physical behavior with visual, auditory, or tactile devices.

**Interaction:** This feature of the VR system provides real-time detection of the user's responses (user movements) to the activities in the game with the help of many sensors (visual, tactile, etc.).

**Imagination:** This feature, specified as imagination, expresses the capacity of the player's mind to perceive things that do not exist. VR supports the user to elaborate thoughts and engage in meaningful learning.

It is possible to classify VR Types as follows:

1. Textual VR (interaction, no inclusive)
2. Desktop VR (interaction, inclusive)
3. Immersive VR (interaction, high inclusive)
4. Augmented VR (interaction, no inclusive)

#### B. Locomotion

One of the most used interaction techniques in the VR environment is motion, which moves the user's perspective in virtual environments. Locomotion is an essential

component of VR as it can substantially impact the user experience. Teleporting has become a popular locomotion interface as it allows VE to be fully explored. To teleport, the user selects the intended location using brain signals before being instantly transported to that location.

In recent years, many variable motion approaches have been used in research [5], [6] and in the game industry [7]. In particular, besides the techniques developed around the idea of natural walking in VR, there are also motion approaches that do not involve a physical movement of the player.

Virtual worlds are hardly ever built in a linear way and players need the ability to change the walking direction. Hence, VR games require Omnidirectional treadmills [8]. Treadmills allow the players to move in a physical way. Combined with an HMD, players usually cannot distinguish such installations from real walking experiences (Figure 3).



Figure 3. The treadmill for real walking

### C. Serious Game and Gamification

AR and VR play an important role in today's world, where we have started doing all our work online due to COVID-19. With these systems, new BCI designs are also reflected in the game world by adding brain signals to applications such as disabled people and distance education/therapy. With BCI, the information read from the brain is analyzed in response to the stimuli given in the immersive and inclusive environment of technologies such as virtual reality. It aims to develop a more immersive and instructive user experience by obtaining information about the player's physiological state during the game.

Digital games are generally perceived as a leisure activities. However, as a result of various studies, it has been observed that digital games positively affect cognitive activity. Some of these non-invasive studies have shown that games change brain dynamics, strengthen information processing and motor skills, and potentially reduce the time required for information processing. These studies show the mixture of different game-playing aspects that affect many factors

such as attention, cognitive control, visuospatial skills, and cognitive workload arising from the mechanical nature of games [9]. For example, unlike strategy games, shooting games (like FPS) require different cognitive demands and different strategies. Different studies have shown that virtual reality design an interactive environment, increasing the participation and motivation of students and providing deeper learning [10].

Gamification and Serious Game are two e-learning strategies with similar aims. However, although they have similar purposes, they also have significant differences. The serious game is used to denote video games used in fields such as education, defense, health, simulation, and engineering instead of entertainment. Gamification, on the other hand, is the application of game-like elements to different fields (marketing, education, etc.) to change attitudes and behaviors and increase participation and effectiveness [11]. The main difference between serious gaming and gamification is that serious games involve structures that offer not only entertainment but also some form of educational value. Gamification, on the other hand, incorporates game elements into traditional e-learning programs to increase engagement. Gamification adds game-like elements to your education, while serious games add educational value to games.

### D. Brain-Computer Interfaces

Brain-Computer Interface (BCI) is a system that provides a direct connection between the brain and the computer to control an external device. These systems are also called Brain-Machine Interface (BMI) systems. EEG-based BCI is characterized by using non-invasive EEG electrodes to measure brain activity and convert the recorded brain signals into commands.

In the literature, BCI is defined as a system that measures the brain's central nervous system activity and converts it into an artificial output, thus ensuring the interaction between the central nervous system and its internal and external environment [12]. A modern BCI system is a brain activity analyzer that takes complex brain signals, analyzes them, and translates them into a command for a machine (usually a computer, a robotic arm, game controllers, prosthesis, wheelchair, etc.) [13], [14].

There are basically three different types of BCI:

**Active BCI:** BCI is used to complete mental tasks. For this, motor signals or imagery completes these tasks. For example, a person raises one's leg to step on a stair step. It is independent of external events. The person provides direct cognitive control.

**Reactive BCI:** This BCI works based on a stimulus (like SSVEP). The P300 (event-related potential) signal further explains the basis of Reactive BCI. The P300 includes cognitive learning and decision-making processes dependent on a visual stimulus. Here, a stimulus is given to the person externally.

**Passive BCI:** BCI works without visual stimuli. The BCI mechanism only acts as an on/off switch. Passive BCI



works willingly without the purpose of controlling, that is, with the outputs of spontaneous brain activity.

### Brain Signal Acquisition Technologies

Advances in functional neuroimaging and inter-cranial spatial imagery have opened new doors in the fields of Cognitive Learning and Associated Neural Networks. BCI systems consist of a mixture of signals from the brain and nervous system. These signals are:

1. Electrical and magnetic signals
2. Intracortical electrode array-invasive method
3. Electrocorticography (Electrocorticography, ECoG or intracranial EEG, IEEEG)-invasive method
4. Electroencephalography (Electroencephalography)
5. Magneto-encephalography (Magnetoencephalography)
6. Metabolic signals
7. Functional magnetic resonance imaging (fMRI)
8. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS)

Signals that are not brain signals:

1. Electromyography (Electromyography, EMG)
2. Electrocardiography (Electrocardiography, ECG)
3. Electrooculography (Electrooculography, EOG)

Table 1. Frequency band ranges

Bands	Range(Hz)	Location	Activity
Delta	1.3 – 3.5	Frontal	Deep sleep.
Theta	4 – 7.5	Various	Theta activity is a slow-wave activity seen in drowsiness and often during meditation. Increased theta frequencies are associated with relaxed and creative states, as well as memory recall and 'flow' states.
Alpha	8 – 13	Back of the head	Alpha waves are the default 'relaxed and alert' mode of your brain. Alpha activity is often observed when the eyes are closed, indicating that the visual system is ready and awaiting input. Decreases in alpha activity can also be seen in other parts of the brain when that part of the brain is activated.
Beta	12.5 – 30	Symmetrically distributed in the left and right hemispheres, mostly anterior	Beta frequencies are associated with active, task-oriented, busy, or anxious thinking and active concentration.
Gamma	30 – 40	Somatosensory cortex	Gamma activity is the high-frequency activity that occurs during demanding mental or motor functions. Gamma waves can be observed, especially in the frontal lobes, when you switch activities during multi-tasking.

## Material and Method

BCI software can translate mental commands from EEG data into commands in a video game. In BCI-based games, subjects wear an EEG headset while playing VR games designed to control virtual objects. Instead of using a traditional game controller, the subject uses mental commands to activate motion-based actions such as "push", "pull" or "jump" in the game. In this study, navigation was made between teleport points with the "push" command, and the "pull" command action was used to open the door of the historic building. BCI processed these mental commands from the EEG and triggered the corresponding movement in the VR game. As gamification, interaction with teleport and Non-Player Character (NPC)

BCI systems measure the electrical activity of the brain and evaluate it with different techniques. EEG method is widely used among non-invasive methods for measuring brain activity. EEG and BCI are currently the focus of research in this area.

### Electroencephalography (EEG)

EEG is a non-invasive method that allows electrical recording activity from the scalp surface [15], [16]. The recording process is made by measuring the voltage fluctuations coming from the brain with various numbers of electrodes placed on the scalp surface. Hans Berger first made this measurement from the scalp surface in 1929 [17]. The electrical activity recorded from the brain is measured in microVolts ( $\mu$ V). The rhythmic activity recorded from the brain is classified into five frequency bands (Table 1): Delta (0.5-4 Hz), Theta (4-8 Hz), Alpha (8-13 Hz), Beta (13-25 Hz), Gamma ( 25-100Hz). These frequency band ranges are used in various studies with slight differences in different fields [18].

corresponding to navigation from game mechanics were used in the study.

A total of 11 subjects (right-handed) without prior experience in the BCI and not diagnosed with any neurological or psychiatric disorder were recruited for the study. Participants ages ranging from 18 to 29 ( $M = 20.25$  years,  $SD = 2.43$ ). The sample was selected from the university student population. Participants of the study hold a Bachelor of Science degree in different disciplines related to computer engineering, electrical-electronics, computer science, and others without BCI experience.

All tasks were performed with the same group of participants and devices. The experiment was performed in a quiet room, with a 3m $\times$ 2.5m space to set up two HTC-

Vive Lighthouses. The VR device was connected to a desktop computer with 64 GB RAM and an Intel Core i7-9700K processor running at 3.60 GHz. The Emotiv EPOC Flex device was wirelessly connected to a laptop with 32 GB RAM and an Intel Core i7-11800H processor running at 2.30 GHz. The desktop computer had Nvidia GeForce RTX 2080 Super GPU (8 GB), while the laptop had Nvidia GeForce RTX 3070 GPU (8 GB) graphics card. It has been used HTC Vive Pro Eye's HMD to display the pre-built virtual scene by Erzurum Virtual City project.

Emotiv EPOC Flex with 32 channels was used as an EEG acquisition device (Figure 4-a). Channels:

Cz, Fz, Fp1, F7, F3, FC1, C3, FC5, FT9, T7, TP9, CP5, CP1, P3, P7, O1, Pz, Oz, O2, P8, P4, CP2, CP6, TP10, T8, FT10, FC6, C4, FC2, F4, F8, Fp2.

Sensor cables are color-coded. Blue is used for the left, red for the right, and black for the references. In addition, each sensor is individually labeled with the channel name to which it is connected to the EPOC Flex. With this color coding, the channel name can be defined quickly in the software, and the appropriate electrode location can be found quickly. For example, if the contact quality is poor in the LA (Left-A) channel, it corresponds to the blue A wire.

Data were obtained from all channels (32 channels), but only the channels in Figure 4-b were used in the BCI software. The channels used in the study are: FC3-FC4 [19], C3, C4, P3, P4 [20], FC5, FC6, P7, P8 [21], Fz, Cz, Pz, Oz.

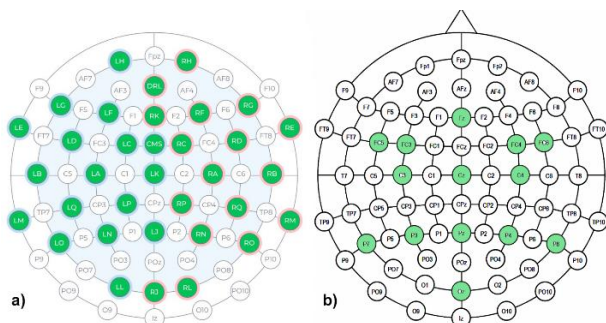


Figure 4. a) EEG electrode placement b) selected electrodes

The flow chart of the study is presented in Figure 5. The signals obtained with the EEG device are transferred to the developed machine learning module (Control Module) with Cortex-V2 (C# programming). Brain signals are converted into commands by the module, and these commands are classified. Among the classification algorithms, two different algorithms were used: Random Forest (RF) and Naive Bayes (NB). The output of the RF classifier was sent to the Unity3D game engine because it gave better accuracy values (Figure 6).

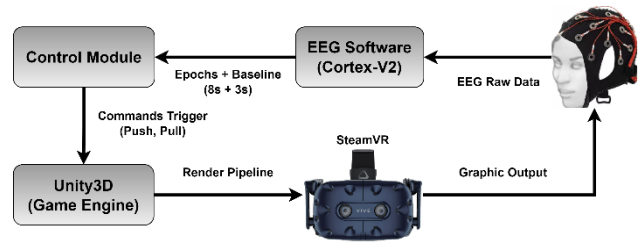


Figure 5. The flowchart of the study

The experimental protocol was determined as follows:

1. Preliminary information was given to the participant. EEG and VR devices were then mounted to the user (Figure 7).
2. Three seconds baseline signal received.
3. Eight seconds teleport signal received.
4. Steps 2 and 3 were repeated five times for training.

The same steps were repeated for the door opening task. A total of 10 training signals were obtained from one subject.

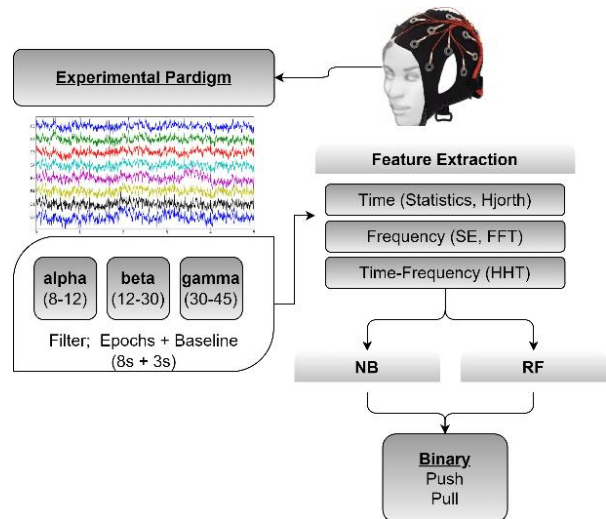


Figure 6. Control module

Erzurum Virtual City, which was prepared with another project as VE, was used on the game engine side. Erzurum Virtual City (Figure 8) virtual elements were modeled with Autodesk Maya, and the characters were rigged. The materials of the virtual items were obtained with Substance Painter. SteamVR v2 framework was used for the VR environment. Gamification was developed in the Unity 3D game engine with the C# programming language. Brain signals obtained with Emotiv EPOC Flex were processed and translated into commands in Unity3D, depending on two mental tasks.



Figure 7. A subject preparing to participate in the experiment (left: EEG device deployment, right: VR device deployment)



Figure 8. Ottoman Era Erzurum Virtual City

Two mental tasks were tested in each historical building in the Erzurum Virtual City tour, both to teleport to specific locations and to open the door of the historic building. Navigation between Teleport Points was performed with the "Push" command. Only the "Pull" command has been applied from the Teleport Point position in front of the door (Figure 9).

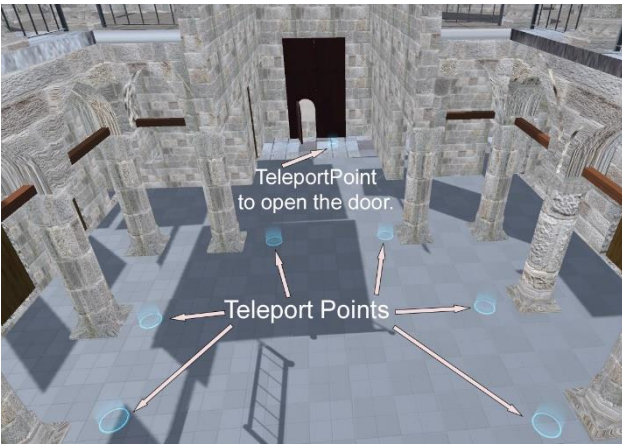


Figure 9. Teleport locations used in BCI

**Time features**

Both statistical and Hjorth parameters are used in the time domain. Statistical estimates of the temporal signals, such as mean, variance, standard deviation, and first/second differences, are usually taken to reduce the effect of temporal variations on signals. Statistics of the signals are given in Table 2. Hjorth, on the other hand, provides a set of three parameters (Table 2) to analyze the EEG signal in

the time domain [22]. The Hjorth algorithm, which has the advantage of low computational cost, is based on variance calculation.

Table 2. Time features (1..5:statistical, 6..8:Hjorth parameters)

No	Measures	Formula
1	Power	$P = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{\infty}  x(t) ^2$
2	Mean	$\mu = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t)$
3	Standard deviation	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x(t) - \mu)^2}$
4	Normalized first difference	$d_{1n} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1}  x(t+1) - x(t) }{\sigma_x}$
5	Normalized second difference	$d_{2n} = \frac{\frac{1}{N-2} \sum_{t=1}^{N-2}  x(t+2) - x(t) }{\sigma_x}$
6	Activity	$A = \frac{\sum_{i=1}^N (x(t) - \mu)^2}{N}$
7	Mobility	$M = \frac{\sqrt{\text{var} \left( \frac{dx(t)}{dt} \right)}}{\sqrt{\text{var} (x(t))}}$
8	Complexity	$C = \frac{M \left( \frac{dx(t)}{dt} \right)}{M(x(t))}$

**Frequency features**

In frequency domain, we used Spectral Entropy (SE) and Fast Fourier Transform (FFT). Spectral Entropy (SE) gives information about the non-linearity situation of an EEG signal (Eq. 1). FFT can be used to show various types of frequency activity in useful ways (Eq. 2).

$$H(x) = \sum_{x \in X} x_i \cdot \log_2 x_i \tag{1}$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \tag{2}$$

**Time-Frequency features**

Hilbert Huang Transform (HHT) presents momentary energy and frequency values of a signal, unlike Fourier spectral analysis which presents global energy and frequency. Since EEG signals contain more than one frequency content, HHT can't be directly used on EEG signals. To solve this problem, Huang proposed Intrinsic Mode Functions (IMF), which considers momentary EEG signals as a sum of single frequency functions. Empirical Mode Decomposition (EMD) is used to separate data into IMFs (Eq. 3). After decomposition, Hilbert transform (Eq. 4) is applied and energy-frequency-time distribution is obtained, this is also known as Hilbert spectrum.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \tag{3}$$

$$y(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t')}{t-t'} dt' \quad (4)$$

where  $c_i(t)$  is the  $n$ th extracted IMF and  $r_n(t)$  is a residual function. HHT is represented by Eq. 4 to find the instantaneous frequency from the IMF, where the PV denotes the Cauchy Principal Value of the singular integral.

## Discussion and results

Feature extraction from the EEG signal is one of the basic steps of classification. The features can be obtained from different domains. In this process, extracting the more dominant features from the EEG signal is important. EEG signals have a complex, nonlinear and Spatio-temporal structure. Therefore, features in the time, frequency, and time-frequency domains were searched to find the most distinctive features. All of these domains were used in this study. In addition, the features were extracted by considering the alpha, beta, and gamma bands of the EEG signals [23], [24].

The results obtained with RF and NB algorithms are given in Table 3. The extracted features for Time, Frequency and Time-Frequency are 140, 942, and 588, respectively.

Table 3. Binary task classification results (NB:Naïve Bayes, RF:Random Forest)

Push/Pull Tasks		Alpha	Beta	Gamma
Time	NB	69.091	58.182	60.909
	RF	81.818	76.364	80.000
Frequency	NB	59.091	70.909	62.727
	RF	<b>82.727</b>	80.000	65.455
Time-Frequency	NB	64.546	66.364	69.091
	RF	80.000	77.273	79.091

In general, the alpha channel has shown higher success. On the domain basis, the frequency domain stands out (Figure 10).

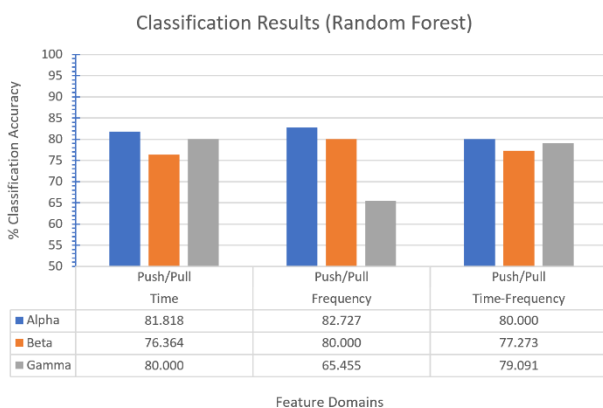


Figure 10. Binary (Push/Pull) classification results for Random Forest

## Conclusion

As a result, the Metaverse can transport you to an entirely different imaginary world where you don't have

constraints (as mentioned in Neal Stephenson's 1992 novel Snow Crash). With BCI, it will ensure the unlimited participation of people with disabilities in this imaginary world.

With the development of technology, digital gaming has become a more holistic and realistic experience that activates all the senses. Game-based learning and serious games often need to be viewed in the light of technology and E-Learning. Also, supporting such designs with BCI will make it a more sustainable environment for Metaverse.

BCI provides the possibility of life-changing for subjects with motor impairments. Because this system allows them to perform physical actions that they would not otherwise be able to do. Since BCI converts brain signals to command results using artificial intelligence algorithms, these commands can be encoded as commands that will provide unlimited control in the Metaverse environment.

Cyber-discomfort in the virtual environment is a relatively common, undesirable side effect of immersive interfaces that causes various irritating symptoms, such as nausea, headaches, disorientation, and fatigue. Although less common, more severe symptoms, such as postural instability, can also result from prolonged exposure to virtual interfaces. Improvements in the direction of eliminating these discomforts by making locomotion movements more natural can be done in future studies.

## Data availability

The dataset will be published at <https://eegdatasets.erzurum.edu.tr>

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

This study, which included human participants, was reviewed and approved by the Scientific Research and Publication Ethics Committee of Erzurum Technical University-ETU (11-2-20052021), Erzurum, TUR. The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study. There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

## Funding

This study is funded by ETU Scientific Research Projects Coordination Unit with the project numbered 2021/012 titled "Examination of VR Locomotion Techniques for Brain-Computer Interface Designs with EEG Signals".

KUDAKA also funded it with the project "Meeting Place of History and Culture" (TRA1/21/REKABET2/0009).

## References

- [1] M. Şeker and M. S. Özerdem, "İyi – kötü koku uyartılarının EEG aktivitesine etkisinin Welch metodu ile incelenmesi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.*, vol. 8, no. 3, pp. 547–553, 2017.
- [2] E. Langbehn, P. Lubos, and F. Steinicke, "Evaluation of locomotion techniques for room-

- scale vr: Joystick, teleportation, and redirected walking,” in *Proceedings of the Virtual Reality International Conf.-Laval Virtual*, 2018, pp. 1–9.
- [3] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino, “Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum,” in *Telemanipulator and telepresence technologies*, 1995, vol. 2351, pp. 282–292.
- [4] G. C. Burdea and P. Coiffet, *Virtual reality technology*. John Wiley & Sons, 2003.
- [5] C. Boletsis, “The new era of virtual reality locomotion: A systematic literature review of techniques and a proposed typology,” *Multimodal Technol. Interact.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–17, 2017, doi: 10.3390/mti1040024.
- [6] E. Bozgeyikli, A. Raij, S. Katkooi, and R. Dubey, “Point & Teleport locomotion technique for virtual reality,” *CHI Play 2016 - Proc. 2016 Annu. Symp. Comput. Interact. Play*, pp. 205–216, 2016, doi: 10.1145/2967934.2968105.
- [7] M. J. Habgood, D. Wilson, D. Moore, and S. Arapont, “Hci lessons from playstation VR.,” in *Extended Abstracts Publication of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 2017, pp. 125–135.
- [8] S. H. Pyo, H. S. Lee, B. M. Phu, S. J. Park, and J. W. Yoon, “Development of an Fast-Omnidirectional Treadmill (F-ODT) for Immersive Locomotion Interface,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 760–766. doi: 10.1109/ICRA.2018.8460669.
- [9] M. Palaus, E. M. Marron, R. Viejo-Sobera, and D. Redolar-Ripoll, “Neural basis of video gaming: A systematic review,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 11, p. 248, 2017.
- [10] S. Mystakidis *et al.*, “Design, Development, and Evaluation of a Virtual Reality Serious Game for School Fire Preparedness Training,” *Education Sciences*, vol. 12, no. 4. 2022. doi: 10.3390/educsci12040281.
- [11] C. Prandi, P. Salomoni, S. Mirri, “Gamification in Crowdsourcing Applications.” 2019.
- [12] J. R. Wolpaw and E. W. Wolpaw, “Brain-computer interfaces: something new under the sun,” *Brain-computer interfaces Princ. Pract.*, vol. 14, 2012.
- [13] S. Ghosh, “Brain Computer Interface: Definition, Tools and Applications,” 2020. <https://aithority.com/machine-learning/neural-networks/brain-computer-interface-definition-tools-and-applications/>
- [14] A. Özbeyaz, “EEG-Based classification of branded and unbranded stimuli associating with smartphone products: comparison of several machine learning algorithms,” *Neural Comput Applic*, no. 33, pp. 4579–4593, 2021.
- [15] E. Niedermeyer and F. H. L. da Silva, *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields*. Lippincott Williams & Wilkins, 2005.
- [16] M. Teplan and others, “Fundamentals of EEG measurement,” *Meas. Sci. Rev.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–11, 2002.
- [17] B. He and L. Ding, “Electrophysiological mapping and neuroimaging,” in *Neural engineering*, Springer, 2013, pp. 499–543.
- [18] J. J. Newson and T. C. Thiagarajan, “EEG frequency bands in psychiatric disorders: a review of resting state studies,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 12, p. 521, 2019.
- [19] M. S. Özerdem and Ö. Emhan, “Yukarı-Aşağı imleç hareketlerine ilişkin EEG kayıtlarında en etkin kanalın belirlenmesi,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.*, vol. 8, no. 3, pp. 587–597, 2017.
- [20] S. Baceviciute, T. Terkildsen, and G. Makransky, “Remediating learning from non-immersive to immersive media: Using EEG to investigate the effects of environmental embeddedness on reading in Virtual Reality,” *Comput. & Educ.*, vol. 164, p. 104122, 2021.
- [21] P. Batres-Mendoza *et al.*, “Quaternion-Based Signal Analysis for Motor Imagery Classification from Electroencephalographic Signals,” *Sensors (Basel)*, vol. 16, no. 3, p. 336, Mar. 2016, doi: 10.3390/s16030336.
- [22] B. Hjorth, “EEG analysis based on time domain properties,” *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 29, no. 3, pp. 306–310, 1970, doi: [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(70\)90143-4](https://doi.org/10.1016/0013-4694(70)90143-4).
- [23] M. Ahn, H. Cho, S. Ahn, and S. C. Jun, “High Theta and Low Alpha Powers May Be Indicative of BCI-Illiteracy in Motor Imagery,” *PLoS One*, vol. 8, no. 11, p. e80886, Nov. 2013, [Online].
- [24] J. Gruenwald, C. Kapeller, C. Guger, H. Ogawa, K. Kamada, and J. Scharinger, “Comparison of Alpha/Beta and high-gamma band for motor-imagery based BCI control: A qualitative study,” in *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2017, pp. 2308–2311. doi: 10.1109/SMC.2017.8122965.



## Data division effect on machine learning performance for prediction of streamflow

Okan Mert KATIPOĞLU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Erzincan Binali Yıldırım University, Civil Engineering Department, okatipoglu@erzincan.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-6421-6087

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 7 August 2022  
Received in revised form 13 October 2022  
Accepted 25 November 2022  
Available online 31 December 2022

#### Keywords:

Stream flows, XGBoost, K-Nearest Neighbours, Data division, Euphrates basin

Doi: 10.24012/dumf.1158748

\* Corresponding author

### ABSTRACT

Accurate estimation of streamflow has an important role in water resources management, disaster preparedness and early warning, reservoir operation, and sizing of water structures. In this study, Extreme gradient boosting (XGBoost) and K-Nearest Neighbours (KNN) algorithms are used for the estimation of streamflow. In order to reveal the appropriate model, the raw model and models with optimized parameters were evaluated while the models were being built. In the setup of the models, various training test rates were also tried, and it was investigated which data division showed more effective results. For this purpose, the data were divided into ratios such as 60-40, 70-30, 80-20, and 90-10, respectively, and the model results were compared. Various statistical indicators such as Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Coefficient of Determination ( $R^2$ ) were used when comparing the models. As a result of the analysis, it was determined that the most suitable model for monthly streamflow estimation was obtained by using the optimized Xgboost algorithm and 60-40% data division. The obtained outputs constitute a vital resource for decision-makers regarding water resources planning and flood and drought management.

## Introduction

Increasing water requirements, climate change and extreme weather events have increased the importance of effective planning and management of water resources [1]. The effective management of water resources depends on the prediction of possible future flows. Accurate and reliable streamflow estimation is crucial regarding irrigation planning, water and electricity supply, flood and drought risks, and reservoir operation. [2]. In particular, estimating maximum and minimum flow values is critical for their use in flood and drought management. The physical formation process of streamflow in a basin is complicated because it depends on several factors such as precipitation, evapotranspiration, infiltration, ground moisture, soil permeability, terrain conditions and vegetation. For this reason, many researchers have modeled past precipitation and streamflow values with various black box models that require less data and can accurately model non-linear relationships [3].

Artificial intelligence (AI) technologies predict streamflows accurately and reliably with the development of AI technologies. However, it has attracted the attention of many researchers about which algorithm can predict

streamflows with higher accuracy. In addition, the most important parameter affecting the success of the AI model is the correct selection of the training and test rate. The determination of this ratio is one of the topics that attracts the attention of many researchers. For this reason, the streamflow estimation performances of various AI techniques and data division ratios have been investigated with different statistical and graphical indicators. Humphrey, et al. [4] employed the bayesian artificial neural network approach and successful estimation results were obtained in the monthly streamflow estimation model by separating 80% of the data for training. Tosunoğlu, et al. [5] used Support Vector Machines (SVM), Adaptive Boosting (AdaBoost), K-Nearest Neighbors (KNN) and Random Forest (RF) methods to estimate monthly flows at station 2305, located in the Euphrates basin. As a result, it has been determined that the RF algorithm is the best. Parisouj, et al. [2] estimated daily flows of Support Vector Regression (SVR), backpropagation Artificial Neural Network (ANN) and Extreme Learning Machine (ELM) in 4 rivers in the United States. Adnan, et al. [6] employed an ANN and genetic algorithm (ANN-GA) and ANFIS-genetic algorithm (ANFIS-GA) and M5 Regression Tree to predict the monthly flow data of Pakistan's Neelum and Kunhar Rivers. It has been determined that the model of

ANN-GA and ANFIS-GA is superior to the Regression Tree. Yu, et al. [1] estimated the inputs that were separated into various components with Fourier transform and 10-day streamflow values using SVR and extreme gradient boosting (XGBoost) algorithms. Ni, et al. [7] used XGBoost and the Gaussian mixture model (GMM) to forecast streamflow data. The GMM-XGBoost model showed the best performance. Tao, et al. [8] were evaluated the effects of various machine learning algorithms and three data divisions, (train-test: 70%–30%, 80–20%, and 90%–10%), to predict streamflows in the semi-arid region of Iraq. As a result of the study, the genetic algorithm and support vector regression hybrid model established using 90% training-10% testing rates showed the best monthly river flow estimation performance. Al-Juboori [9] combined KNN and RF algorithms to generate monthly flow data for a river from annual flow data. Dornpunya, et al. [10] used the XGBoost algorithm and three different data divisions to estimate the daily and monthly reservoir inflow values of Sirikit Dam in Thailand. As a result of the study, the results of the appropriate estimation were obtained in the case of the training and testing ratio of 80:20. Tyralis, et al. [11] estimated daily stream flows with various models such as extremely randomized trees, XGBoost, random forests, MARS, lasso, support vector regression, ARIMA. Adnan, et al. [12] used bio-inspired algorithms and various machine learning models for flow prediction in Pakistan. Meshram, et al. [13] applied ANFIS, GP and ANN to predict streamflow in the Shakkar watershed, India. Katipoğlu [14] modeled the monthly average stream flows of the Karasu river, 2154 no, with ANN. In the model setup, the data were separated as 70% train, 15% test, and 15% validation. As a result, successful predictions were obtained.

The main objectives of this study are:

- Comparison of the performances of XGBoost and K-NN algorithms from the estimation of monthly flows
- Evaluation of the effect of data division ratios on the performance of machine learning models.

### Extreme gradient boosting (XGBoost)

XGBoost is a widely applied machine learning algorithm for tree boosting proposed by Chen and Guestrin [15]. XGBoost is a faster and better-performing variant of gradient-assisted decision trees. Gradient boosting establishes new models to predict previous model errors. The latest model combines all installed models. In this algorithm, the tree ensemble model has trained additively until the stopping criteria are met. Xgboost is based on the Classification and Regression Tree (CART) and uses the minimization of the loss function to reveal partition attributes. XGBoost minimizes the loss function via Equation (1) to detect the most suitable feature.

$$\text{Obj}(\theta) = \sum_{i=1}^n L(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k) \quad (1)$$

Where  $L(y_i, \hat{y}_i)$  shows the training error [16].

### K-Nearest Neighbours (KNN)

It is an algorithm that makes classification based on the distance between the data of a problem. The logic of this classification is expressed by the distance between the samples from the same class or from different classes according to their similarities. In the variable estimation of the KNN algorithm, it applies an input from the training data by comparing it with the value of the nearest neighbors. First, classification is done by the proximity of a selected feature to its closest feature. Then, the distances between the objects are calculated using Equation (2) [17].

$$d(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (2)$$

## Material and Methods

### Study area and data

The mean annual flow of the Euphrates is roughly 32 000 m<sup>3</sup> and 80% of this amount is located in the upper basin to the north of the Keban Dam. The maximum flow in April and May corresponds to 42% of the total annual flow. Flow values in the Euphrates River basin vary between 200 and 2000 m<sup>3</sup>/s. The lowest flows are observed in the winter, while the highest flows occur in the spring [18].

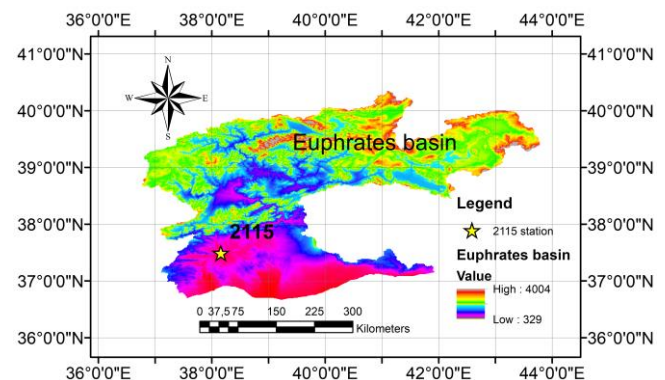


Figure 1. Digital elevation model of Euphrates basin.

The data used in the study were taken from the streamflow observation yearbooks organized by the general directorate of electric power resources survey and development administration (EIEI). These data cover the years 1970 to 2009 (40 years). The location map of the streamflow observation station used in the study is presented in Fig. 1. In Table A1, some statistical properties of the stream flows of the Göksu river numbered 2115 are given. The stream

flow station is located at 38° 9' 26'' East - 37° 29' 36'' North coordinates and 397 m altitude. In addition, the precipitation area of the basin is 185,000 km<sup>2</sup>.

**Performance criteria**

Root mean square error (RMSE) gives the standard deviation of the best fit, which shows the closeness of the data to the best fit line. The mean of the absolute errors in a set of predictions is expressed as the mean absolute error (MAE). Having RMSE and MAE values close to zero will show the model's success. The coefficient of determination (R<sup>2</sup>) expresses how well the estimated and actual data represent the regression line. R<sup>2</sup> value close to 1 indicates the model's success [19]. The R<sup>2</sup> value measures the linear relationship between actual and predicted values. Henseler, et al. [20] stated that 0.75, 0.50 and 0.25 values for R<sup>2</sup>, respectively, indicate significant, moderate and poor fit. The statistical indicators are calculated with Equations (3, 4, 5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2} \tag{3}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |\hat{Q}_i - Q_i|}{N} \tag{4}$$

$$R^2 = 1 - \frac{(Q_i - \hat{Q}_i)^2}{(Q_i - \bar{Q})^2} \tag{5}$$

where N, Q<sub>i</sub>,  $\hat{Q}_i$ , and  $\bar{Q}$  show the sample's length, real value, predicted value, and the mean of the real values, respectively.

**Results and Discussion**

This study used KNN and Xgboost algorithms to estimate monthly flows. In addition, the effects of data division ratios on model success were investigated in flow estimation. For machine learning models' setup, autocorrelation (ACF) and partial autocorrelation (PACF) graphs of flow data were obtained. Lagged streamflow values with an autocorrelation above 95% limits in the graphs were chosen as inputs to the ML models (Fig. 2).

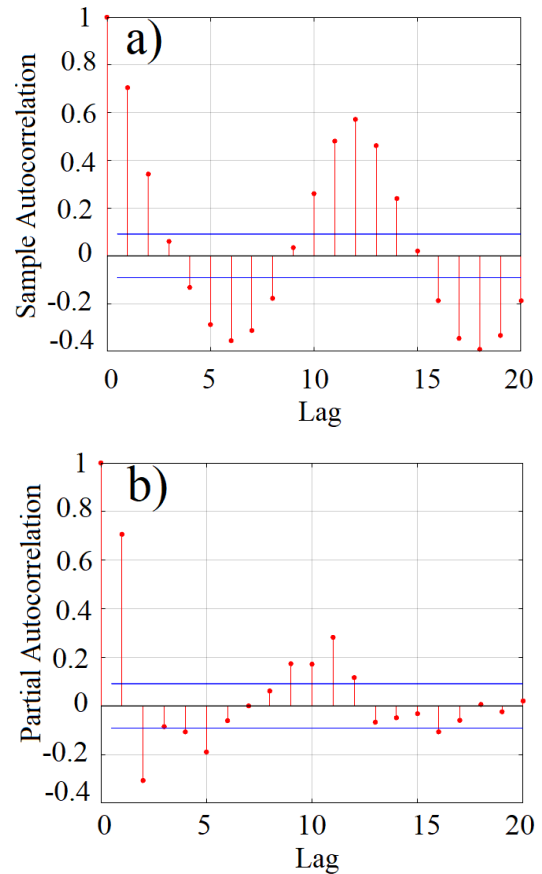


Figure 2. a) ACF, b) PACF graphs.

Fig. 2 shows the ACF and PACF graphs of the 2115 flow observation station. According to the ACF and PACF graphs, the flow values showing the highest intrinsic dependency were used as inputs to the machine learning models for flow estimation. According to the graphs, it was decided to estimate the flow values using the data of the past eight months.

*Established model:  $f(Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3), Q(t-4), Q(t-5), Q(t-6), Q(t-7), Q(t-8)) = Q(t)$*

The data division rates tried are shown in Table 2. Here, the most commonly used data rates for establishing ML models in the literature are tested and how the performance of ML models changes is analyzed.

Table 2. Data division combinations

Model	Train	Test
M1	%60	%40
M2	%70	%30
M3	%80	%20
M4	%90	%10



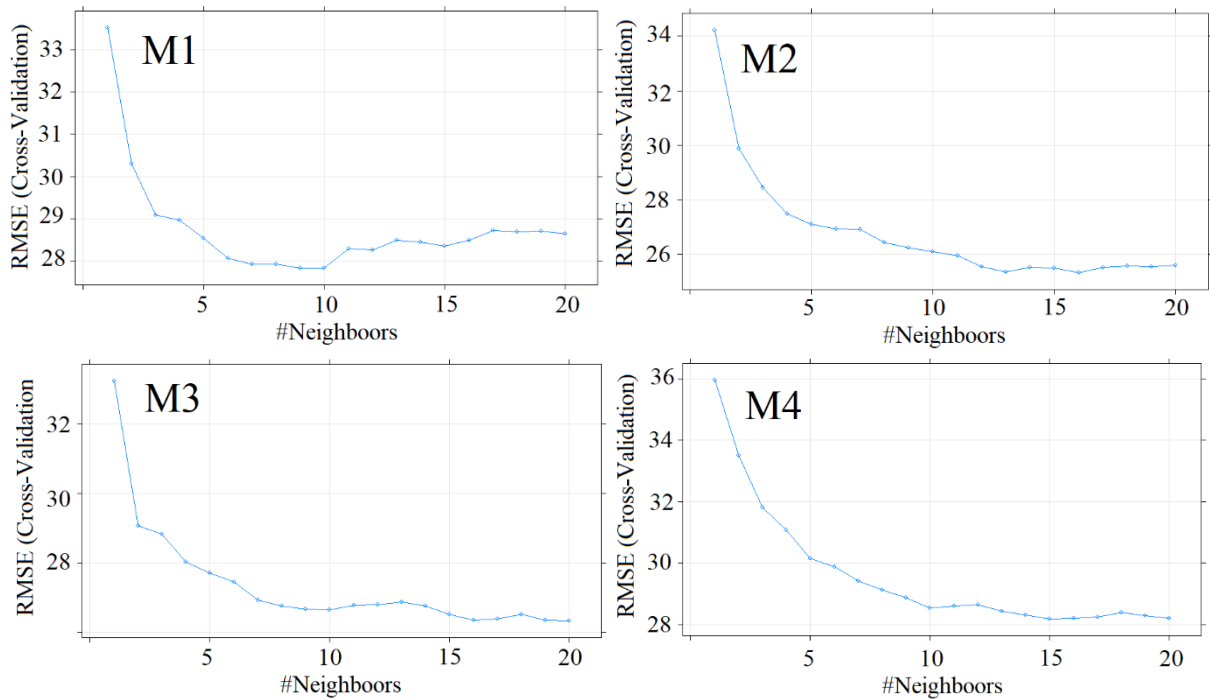


Figure 3 Selection of the optimum k parameter of the KNN model.

In Fig. 3, the change of k parameters of the KNN model is shown. To optimize the KNN model, the model with the lowest error rate was selected as the best model by being tested between k = 1:20. Accordingly, a regression model was established with 10, 16, 20 and 15 nearest neighbor values in M1, M2, M3 and M4 models, respectively.

Table 3. Test results of KNN and Xgboost models in various data divisions

	KNN			Total Rank	Xgboost			Total Rank
	RMSE	R <sup>2</sup>	MAE		RMSE	R <sup>2</sup>	MAE	
<b>M1</b>	<b>28.240</b>	<b>0.559</b>	<b>18.733</b>	<b>9</b>	<b>25.602</b>	<b>0.639</b>	<b>16.060</b>	<b>10</b>
<b>Rank</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>		<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	
M2	33.374	0.582	19.276	8	30.296	0.627	16.754	7
Rank	2	4	2		2	3	2	
M3	34.348	0.517	20.141	4	32.743	0.539	18.618	3
Rank	1	2	1		1	1	1	
M4	24.584	0.482	16.158	9	23.049	0.571	13.252	10
Rank	4	1	4		4	2	4	

Note: Bold characters indicate best model and data division

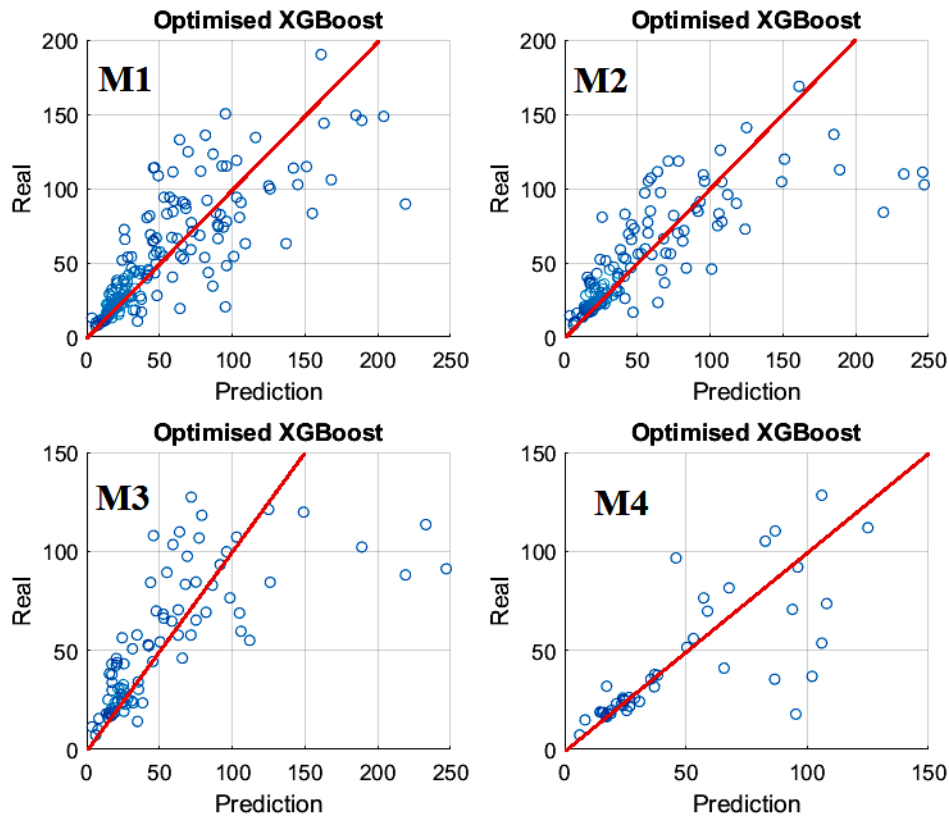


Figure 4. Scatter diagrams of test data of Xgboost models.

Table 3 shows the performances of Xgboost and KNN algorithms in estimating monthly flows using various data division ratios. According to the total rank values, the most successful data divisions are 60-40% and 90-10%. However, when the estimation results obtained with the 90-10% data rates of the KNN model are examined, it has been determined that the rate of 60-40% is better in the flow estimation since the  $R^2$  value is below the acceptable value of 0.5. In addition, it has been determined that the most successful algorithm in monthly flow estimation is Xgboost. In the established XGBoost model, parameters rounds = 1000, max\_depth = 6, eta = 0.01, gamma = 0, colsample\_bytree = 1, min\_child\_weight = 1, subsample = 0.5 are used.

Fig. 4 shows the scatter diagrams obtained for various data rates of the Xgboost models. Scattering diagrams show the relationship between actual and predicted current values. It has been determined that the Xgboost model, established using the M1 data division ratio (60-40%), performs the best because the actual and predicted data are distributed around a 45° line.

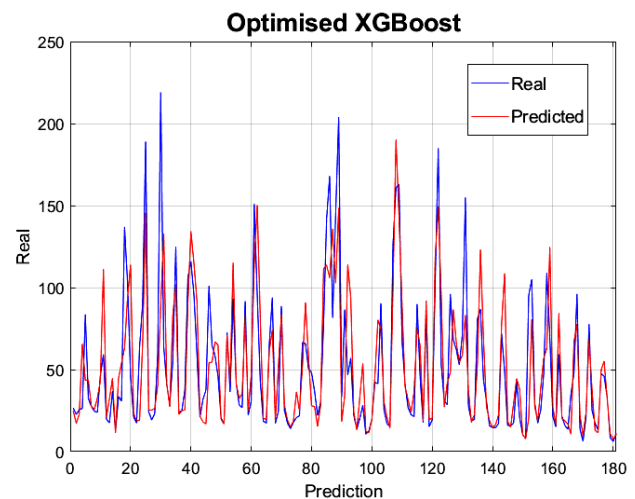


Figure 5. Scatter diagrams of test data of best model.

The flow line of the XGBoost model installed with the M1 combination is shown in Figure 5. The fact that the actual and estimated current values are compatible with each other confirms the high performance of the established model. Furthermore, when the figure is examined, the established model predicts the monthly average streamflow data satisfactorily, except for some maximum values.

Tao, et al. [8] investigated the effect of data division in estimating stream flows, and as a result, the most successful results were obtained using 90% training-10% testing rates. Katipoğlu [14] estimated monthly flows with the ANN model. In designing the model, the data was divided into 70% train, 15% test, and 15% validation. As a result of the research, realistic estimation results were produced. When the literature is evaluated, the data rates used in different locations can produce successful output in streamflow estimation. For this reason, it is necessary to choose the appropriate model by trying various data division ratios.

Ghorbani, et al. [21] revealed that the cascade correlation neural network and the random forest algorithm indicated high streamflow prediction achievement. Ni, et al. [7] determined that XGBoost is better than SVM in streamflow prediction. Elkurdy, et al. [22] combine the prediction Variational Mode Decomposition (VMD) and XGBoost models in daily streamflow in the Bow River (Alberta, Canada). As a result, it has been determined that the hybrid VMD-XGBoost model exhibits very high prediction success. The outputs of the study are largely in line with previous studies. In this direction, it can be deduced that the XGBoost algorithm has significantly superior features in estimating monthly flow data. In addition, it is thought that it can be used in other basins and stations.

## Conclusion

This study used machine learning models such as KNN and Xgboost to predict monthly flows at the streamflow observation station 2115 in the Euphrates basin. In addition, the effect of data division ratios on model performance in flow estimation was investigated. The main outputs of the study are listed as follows:

- Xgboost algorithm presented the most successful result in estimating monthly flows.
- It has been determined that flows can be predicted effectively using data from the past eight months.  $R^2$ : 0.639 value indicates that currents can be modeled satisfactorily.
- The best data division is obtained by using training: 60% and testing 40%.
- It has been understood that ACF and PACF graphics have a remarkable place in the selection of the input combination.
- As a result of the study, streamflow data can be predicted effectively with AI methods. When Figure 5 is examined, while the minimum streamflows can be estimated effectively, the maximum streamflows deviate significantly from the actual values. This

proves that the XGBoost algorithm can effectively predict low flows and droughts.

- The study's main limitation is the analysis in a single station. Therefore, to develop the results, it is necessary to test the models in different climatic regions and streams with varying flow regimes.
- To increase the performance of the flow estimation model, it is recommended to try hybrid ML models with various preprocessing methods such as empirical mode decomposition and Wavelet transform in future studies.

## Acknowledgement

Thanks to the General Directorate of Electric Power Resources Survey and Development Administration for providing monthly stream flows

## References

- [1] X. Yu, Y. Wang, L. Wu, G. Chen, L. Wang, and H. Qin, "Comparison of support vector regression and extreme gradient boosting for decomposition-based data-driven 10-day streamflow forecasting," *Journal of Hydrology*, vol. 582, p. 124293, 2020.
- [2] P. Parisouj, H. Mohebzadeh, and T. Lee, "Employing machine learning algorithms for streamflow prediction: a case study of four river basins with different climatic zones in the United States," *Water Resources Management*, vol. 34, no. 13, pp. 4113-4131, 2020.
- [3] W. Wang, *Stochasticity, nonlinearity and forecasting of streamflow processes*. Ios Press, 2006.
- [4] G. B. Humphrey, M. S. Gibbs, G. C. Dandy, and H. R. Maier, "A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: integrating hydrological model outputs into a Bayesian artificial neural network," *Journal of Hydrology*, vol. 540, pp. 623-640, 2016.
- [5] F. Tosunoğlu, S. HANAY, E. Çintaş, and B. Özzyer, "Monthly streamflow forecasting using machine learning," *Erzincan University Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 1242-1251, 2020.
- [6] R. M. Adnan, Z. Liang, A. Kuriqi, O. Kisi, A. Malik, and B. Li, "Streamflow forecasting using heuristic machine learning methods," in *2020 2nd International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)*, 2020: IEEE, pp. 1-6.
- [7] L. Ni et al., "Streamflow forecasting using extreme gradient boosting model coupled with Gaussian mixture model," *Journal of Hydrology*, vol. 586, p. 124901, 2020.
- [8] H. Tao et al., "Training and testing data division influence on hybrid machine learning model process:

- application of river flow forecasting," Complexity, vol. 2020, 2020.
- [9] A. M. Al-Juboori, "A hybrid model to predict monthly streamflow using neighboring rivers annual flows," Water Resources Management, vol. 35, no. 2, pp. 729-743, 2021.
- [10] P. Dornpunya et al., "The reservoir inflow prediction of Sirikit dam using artificial intelligence with machine learning: extreme gradient boosting technique," artificial intelligence, vol. 25, p. 26, 2021.
- [11] H. Tyralis, G. Papacharalampous, and A. Langousis, "Super ensemble learning for daily streamflow forecasting: Large-scale demonstration and comparison with multiple machine learning algorithms," Neural Computing and Applications, vol. 33, no. 8, pp. 3053-3068, 2021.
- [12] R. M. Adnan, R. R. Mostafa, A. Elbeltagi, Z. M. Yaseen, S. Shahid, and O. Kisi, "Development of new machine learning model for streamflow prediction: Case studies in Pakistan," Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, vol. 36, no. 4, pp. 999-1033, 2022.
- [13] S. G. Meshram, C. Meshram, C. A. G. Santos, B. Benzougagh, and K. M. Khedher, "Streamflow prediction based on artificial intelligence techniques," Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, vol. 46, no. 3, pp. 2393-2403, 2022.
- [14] O. M. Katipoğlu, "Monthly stream flows estimation in the Karasu river of euphrates basin with artificial neural networks approach," Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, vol. 10, no. 3, pp. 917-928, 2022.
- [15] T. Chen and C. Guestrin, "Xgboost: A scalable tree boosting system," in Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining, 2016, pp. 785-794.
- [16] W. Yucong and W. Bo, "Research on EA-xgboost hybrid model for building energy prediction," in Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1518, no. 1: IOP Publishing, p. 012082.
- [17] D. Kılınc, E. Borandağ, F. Yücalar, V. Tunalı, M. Şimşek, and A. Özçift, "KNN algoritması ve r dili ile metin madenciliği kullanılarak bilimsel makale tasnifi," Marmara Fen Bilimleri Dergisi, vol. 28, no. 3, pp. 89-94, 2016.
- [18] A. Yıldırım, "Karakaya barajı ve doğal çevre etkileri," DÜ Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi, vol. 6, pp. 32-39, 2006.
- [19] M. Rose and N. Chithra, "Tree-based ensemble model prediction for hydrological drought in a tropical river basin of India," International Journal of Environmental Science and Technology, pp. 1-18, 2022.
- [20] J. Henseler, C. M. Ringle, and R. R. Sinkovics, "The use of partial least squares path modeling in international marketing," in New challenges to international marketing: Emerald Group Publishing Limited, 2009.
- [21] M. A. Ghorbani, R. C. Deo, S. Kim, M. Hasanpour Kashani, V. Karimi, and M. Izadkhah, "Development and evaluation of the cascade correlation neural network and the random forest models for river stage and river flow prediction in Australia," Soft Computing, vol. 24, no. 16, pp. 12079-12090, 2020.
- [22] M. Elkurdy, A. D. Binns, and B. Gharabaghi, "Improved Streamflow Forecasting Using Variational Mode Decomposition and Extreme Gradient Boosting," in AGU Fall Meeting Abstracts, 2020, vol. 2020, pp. H165-0003.

## Appendix

Table A1. Summary statistics of stream flows at station 2115

Statistic	October	November	December	January	February	March	April	May	June	July	August	September
Max.	51.10	89.00	106.00	125.00	148.00	247.00	279.00	163.00	67.80	42.00	28.80	25.60
Min.	7.81	2.70	17.10	16.60	18.60	31.70	25.80	15.60	7.83	3.65	3.60	6.18
Mean	20.89	28.18	44.80	54.40	67.35	101.37	112.78	71.67	38.40	24.15	17.64	16.03
Total	818	1091	1758	2143	2662	3978	4432	2831	1537	968	708	641
Skewness	1.56	2.21	0.84	0.74	0.33	1.77	0.90	0.67	0.11	0.06	-0.08	-0.09
Kurtosis	3.49	6.85	-0.54	-0.31	-0.01	3.47	0.37	-0.15	-0.92	-0.68	-0.70	-0.76
Median	19.15	24.95	34.35	51.10	68.00	87.85	92.05	63.45	37.45	24.30	17.20	15.55
Standart deviation	8.41	15.15	26.29	30.78	29.31	49.26	60.43	34.94	15.25	9.58	6.91	5.59
Variance	70.65	229.59	691.26	947.42	859.06	2427	3651	1220	232	91.84	47.80	31.22



# Investigation of Slime Mould Algorithm and Hybrid Slime Mould Algorithms' Performance in Global Optimization Problems

Osman ALTAY<sup>1</sup>, Elif VAROL ALTAY<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar University, Department of Software Engineering, Manisa, [osman.altay@cbu.edu.tr](mailto:osman.altay@cbu.edu.tr), ORCID: 0000-0003-3989-2432

<sup>2</sup>Manisa Celal Bayar University, Department of Software Engineering, Manisa, [elif.altay@cbu.edu.tr](mailto:elif.altay@cbu.edu.tr), ORCID: 0000-0001-8087-2754

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 19 September 2022

Received in revised form 4 December 2022

Accepted 5 December 2022

Available online 31 December 2022

### Keywords:

Slime mould algorithm, leader SMA, equilibrium optimizer SMA, CEC2020

## ABSTRACT

The Slime mould algorithm (SMA) is a relatively new metaheuristic technique that was just presented. While the performance of the newly proposed algorithms gives satisfactory results in optimization problems, combining a recently proposed algorithm with the components of different algorithms improves the performance of SMAs. In recent years, leader SMA (LSMA) and equilibrium optimizer SMA (ESMA) methods, in which SMA is combined with different algorithms, have been proposed. The advantages of the two proposed methods over SMA in different problems are shown. In this study, in order to eliminate the disadvantages of SMA, such as slow convergence rate and local optimum, the performances of the CEC2020 test functions were investigated together with the LSMA and ESMA methods proposed in recent years. The results obtained are statistically analyzed and given in detail in the study.

Doi: 10.24012/dumf.1177288

\* Corresponding author

## Introduction

Metaheuristic algorithms have gained unexpectedly widespread popularity in recent years. Their proficiency in tackling several optimization challenges has resulted in this development [1]. Among the popular metaheuristic optimization algorithms in the literature are particle swarm optimization, genetic algorithms, differential evolution algorithms, and ant colony algorithms, as well as algorithms such as Grey Wolf Optimizer [2], Equilibrium Optimizer [3], Archimedes Optimization Algorithm [4], Spotted Hyena Optimizer [5], Aquila Optimizer [6], and Slime Mold Optimization Algorithm (SMA) [7], which were proposed in recent years. While each metaheuristic algorithm has distinct benefits, no method, according to the no-free lunch theorem, can handle all optimization problems. The performance of a metaheuristic algorithm is largely determined by its capacity for exploration and exploitation [8]. As a result, numerous scholars are continually proposing new algorithms and improving upon the original method. However, while having various appealing properties, it has been noted that these algorithms do not always perform as expected. The effectiveness of most metaheuristic optimization algorithms is dependent on the balance of two opposing aims, exploration and

exploitation [9]. It is also called exploration and exploitation, diversification and intensification. Exploration guarantees that all areas of the solution domain are sufficiently investigated to provide an approximation of the global optimal solution. Exploitation directs the search effort toward the most effective solutions that have been found up to this point by exploring the environment for further options that are more effective. These two objectives are addressed by search algorithms that use local search techniques, global search approaches, or a combination of both local and global searches: these algorithms are frequently referred to as hybridization [10].

Hybridization may take place in a variety of ways, including the following:

- Starting the algorithm with one method and then applying the second technique to the final population generated with the first technique,
- Merging the approach's distinctive operators into the other technique,
- Using local search to enhance the answer identified by global search, and so on.

The main motivation for the paper is to examine the performance of SMA and different hybrid SMAs in global

optimization problems. For this purpose, the leader SMA (LSMA) [11] and equilibrium SMA (ESMA) [12] methods suggested by Naik et al. were chosen. The performance of these three different methods has been examined in the current and widely used CEC2020 test suite. The CEC2020 benchmark problems consist of 10 different optimization problems. These are unimodal functions, multimodal functions, hybrid functions, and composition functions. Furthermore, the performance of these methods was examined using different dimension values, and detailed analyses were carried out. Thus, the different capabilities of the methods obtained as a result of hybridization of a current optimization algorithm were compared with each other and with the original method in different types of problems, and a detailed examination was provided.

The remainder of the paper is organized as follows: To begin with, Section 2 provides an overview of SMA, LSMA, and ESMA. Section 3 describes ten distinct functions drawn from the CEC2020 test functions. Section 4 contains the experimental findings for the test functions. Finally, in Section 5, conclusions are stated and recommendations for further study are made.

### Slime Mould Algorithm

In this section, SMA, and hybrid versions of SMA, LSMA, and ESMA, are explained and their mathematical expressions are given.

#### Original Slime Mould Algorithm

The mathematical notation of SMA consists of three steps. These are approach food, wrap food, and grabble food. In this section, the mathematical structure of SMA is briefly explained [13].

**Approach Food:** To describe slime mould's approaching behavior as a mathematical equation, the following contraction rule is proposed:

$$\overrightarrow{X}(t+1) = \begin{cases} \overrightarrow{X}_b(t) + \overrightarrow{vb} \cdot (\overrightarrow{W} \cdot \overrightarrow{X}_A(t) - \overrightarrow{X}_B(t)), & r < p \\ \overrightarrow{vc} \cdot \overrightarrow{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (1)$$

where  $\overrightarrow{vb}$  is a  $[-a, a]$  parameter,  $\overrightarrow{vc}$  decreases linearly from 1 to 0.  $t$  indicates the current iteration,  $\overrightarrow{X}_b$  denotes the region with the highest concentration of odor,  $\overrightarrow{X}$  denotes slime mould position,  $\overrightarrow{X}_A$  and  $\overrightarrow{X}_B$  represent two randomly chosen swarm members, and  $\overrightarrow{W}$  represents slime mould weight.

The following is the formula for the variable  $p$ :

$$p = \tanh|S(i) - DF| \quad (2)$$

where  $i \in 1, 2, \dots, n$ ,  $S(i)$  is the  $\overrightarrow{X}$ 's fitness, and  $DF$  is the best fitness in all iterations.

$\overrightarrow{vb}$  is given below:

$$\overrightarrow{vb} = [-a, a] \quad (3)$$

$$a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{t}{\max\_t}\right) + 1\right) + 1 \quad (4)$$

$\overrightarrow{W}$  formula is given below:

$$\overrightarrow{W}(\operatorname{SmellIndex}(i)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \log\left(\frac{bF-S(i)}{bF-wF} + 1\right), & \text{condition} \\ 1 - r \cdot \log\left(\frac{bF-S(i)}{bF-wF} + 1\right), & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

$$\operatorname{SmellIndex} = \operatorname{sort}(S) \quad (6)$$

where  $S(i)$  ranks in the top fifty percent of the population,  $r$  represents a random value in  $[0,1]$ ,  $bF$  denotes the best fitness in the current iteration phase,  $wF$  means the worst fitness value,  $\operatorname{SmellIndex}$  specifies the series of sorted fitness values.

**Wrap Food:** The following equation may be used to update the position of slime mold:

$$\overrightarrow{X}^* = \begin{cases} \operatorname{rand} \cdot (UB - LB) + LB, & \operatorname{rand} < z \\ \overrightarrow{X}_b(t) + \overrightarrow{vb} \cdot (W \cdot \overrightarrow{X}_A(t) - \overrightarrow{X}_B(t)), & r < p \\ \overrightarrow{vc} \cdot \overrightarrow{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (7)$$

where  $\operatorname{rand}$  and  $r$  stand for the random value in  $[0,1]$ , and  $LB$  and  $UB$  stand for the lower and upper search range limits.

**Grabble Food:** As the number of iterations rises, the value of  $\overrightarrow{vb}$  varies at random between  $[-a, a]$  and eventually approaches zero. The value of  $\overrightarrow{vc}$  varies between  $[-1,1]$  and finally goes to zero.

#### Leader Slime Mould Algorithm

SMA's primary reliance on the population's two slime molds and best leader leads to poor exploitation when more convergence iterations are performed. To eliminate this situation, LSMA has been proposed [1].

According to [2], the updating rule of the SMA concentration for the  $i$ -th slime mould  $X_i (= \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k\})$  for a  $k$  dimensional issue from  $N$  slime mould is as follows:

$$\overrightarrow{X}^* = \begin{cases} \operatorname{rand} \cdot (UB - LB) + LB, & r_1 < z \\ X_{GlobalBest}(t) + V_a \cdot (W \cdot X_{R1} - X_{R2}), & r_1 \geq z \text{ and } r_2 < p \\ V_b \cdot X_i(t), & r_1 \geq z \text{ and } r_2 \geq p \end{cases} \quad (8)$$

and

$$X_i(1) = r_1 \cdot (UB - LB) + LB \quad (9)$$

The  $r_1$  and  $r_2$  are random values in the range of 0 and 1;  $t$  is the current iteration,  $UB$  and  $LB$  upper and lower boundary of the search space, respectively,  $X_{GlobalBest}$  is the global best concentration current iteration  $t$ ,  $V_a$

represents the velocity that is spread evenly throughout the interval,  $V_b$  represents the velocity that goes from 1 to 0 in a linear fashion,  $W$  represents the weight of the slime mould,  $X_{R1}$  and  $X_{R2}$  are the two types of slime mould that were chosen at random from the population of  $N$ ,  $p$  is the probability to determine the slime mould trajectory,  $z$  is the elimination-and-dispersal rate which is fixed at 0:03 and  $i \in 1, 2, \dots, N$ .

The performance of the  $i$ -th slime mould is determined by its current fitness  $f(X_i)$  and by the fitness of the world's best concentration  $f(X_{L1})$ , which is formulated as:

$$p = \tanh|f(X_i) - f(X_{L1})| \quad (10)$$

Both the velocity  $V_a$  and the velocity  $V_b$  are equally distributed in the  $[-a, a]$  and  $[-b, b]$  ranges, respectively. The values of  $a$  and  $b$  are as follows:

$$a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{t}{t_{\max}}\right) + 1\right) \quad (11)$$

and

$$b = 1 - \frac{t}{t_{\max}} \quad (12)$$

The  $W$  is calculated using the slime mould's local fitness value. Let's rank the  $N$  slime mould's fitness value for the minimization issue in ascending order in iteration  $t$ .

$$[\text{sorted}_{fitness}, \text{sort}_{Index}] = \text{sort}(f) \quad (13)$$

where  $f = (f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_N))$

The  $W$  is then calculated as follows:

$$W(\text{sort}_{Index}(l)) = \begin{cases} 1 + r_3 \cdot \log\left(\frac{f_{LocalBest} - \text{sort}f(l)}{f_{LocalBest} - f_{LocalWorst}} + 1\right), & 1 \leq l \leq \frac{N}{2} \\ 1 - r_3 \cdot \log\left(\frac{f_{LocalBest} - \text{sort}f(l)}{f_{LocalBest} - f_{LocalWorst}} + 1\right), & \frac{N}{2} \leq l \leq N \end{cases} \quad (14)$$

$$f_{LocalBest} = \text{sortedFitness}(1) \quad (15)$$

$$f_{LocalWorst} = \text{sortedFitness}(N) \quad (16)$$

The best concentration globally is designated as leader1 (L1), while Leader2 (L2) and Leader3 (L3) stand for the second and third greatest concentrations, respectively. The model for the new updating rule of  $i$ th slime mould at iteration  $(t + 1)$  in LSMA is:

$$X_i(t + 1) = r_1 \cdot (UB - LB) + LB, \text{ when } r_1 < z \quad (17.a)$$

$$X_i(t + 1) = X_{L1}(t) + V_a \cdot (W \cdot X_{L2} - X_{R1}) + (W \cdot X_{L3} - X_{R2}), \quad r_1 \geq z \text{ and } r_2 < p \quad (17.b)$$

$$X_i(t + 1) = V_b \cdot X_i(t), \text{ when } r_1 \geq z \text{ and } r_2 \geq p \quad (17.c)$$

### Equilibrium Optimizer Slime Mould Algorithm

The search pattern of the SMA requires differential information between two random slime molds and the best slime mold, which may cause results to deviate from the optimum value. The equilibrium pools of the top potential solutions determine how EO searches.

In order to increase integrate the equilibrium pool and augment the SMA's properties, Naik et al. suggested the ESMA.

The air smell is how the slime mold finds the food. Assume there are  $N$  slime molds, each of whose location is given by the vector  $X = [\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_N]'$ . The  $i$ th slime mold's starting location vector is generated at random as Eq. (18):

$$\vec{X}_i(t = 1) = r_1 \cdot (UB - LB) + LB, i = 1, 2, \dots, N. \quad (18)$$

where  $t$  denotes the current iteration number,  $UB$  upper bound and  $LB$  lower bound. The new iteration in  $t + 1$  is modeled as in Eq. (19).

$$\vec{X}_i(t + 1) = \begin{cases} r_1 \cdot (UB - LB) + LB & r_1 < z \\ \vec{X}_{Gbest} + \text{step}a \cdot (\vec{W} \cdot \vec{X}_A - \vec{X}_B) & r_2 < p_i(t) \text{ and } r_1 \geq z \\ \text{step}b \cdot \vec{X}_i(t) & r_2 \geq p_i(t) \text{ and } r_1 \geq z \end{cases} \quad (19)$$

Here  $\vec{X}_{Gbest}$  is the global best value in the number of iterations.  $\vec{X}_A$  and  $\vec{X}_B$  are two randomly selected individuals in  $t$  iterations. The  $r_1$  and  $r_2$  values are random variables that take values between 0 and 1. The  $z$  value is 0.03, which is a constant. This number represents the likelihood that is used in the process of eradicating and dispersing the slime mold.

The weighting factor for the slime mold at iteration  $t$  is known as the  $\vec{W}$  value, and it is determined using the local fitness value. The order of the fitness values in ascending order is done with  $[\text{sort}f, \text{sort}Index] = \text{sort}(f)$ , where  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ . Thus, the value of  $w$  is calculated as in Eq. (20).

$$\vec{W}(\text{sort}Index(j)) = \begin{cases} 1 + r_3 \cdot \log\left(\frac{f_{Lbest} - \text{sort}f(j)}{f_{Lbest} - f_{Lworst}} + 1\right) & 1 \leq j \leq \frac{N}{2} \\ 1 - r_3 \cdot \log\left(\frac{f_{Lbest} - \text{sort}f(j)}{f_{Lbest} - f_{Lworst}} + 1\right) & \frac{N}{2} < j \leq N \end{cases} \quad (20)$$

The  $r_3$  value is random variables that take values between 0 and 1.  $f_{Lworst}$  and  $f_{Lbest}$  are the local worst ( $f_{Lworst} = \text{sort}f(N)$ ) and best fitness ( $f_{Lbest} = \text{sort}f(1)$ ) values, respectively, in the current iteration. The  $p_i$  value is calculated as in Eq. (21).  $p_i$  value with the help of other slime molds  $i$ . shows the decision probability of the trajectory of the slime mold.

$$p_i = \tanh|f(X_i) - f_{Gbest}| \quad (21)$$



Here, the  $i$  value ranges from 1 to  $N$ , and  $X_i$  shows the position of the slime molds in the  $i$ 'th iteration.  $f_{Gbest}$ , on the other hand, holds the best global best fitness value up to the current iteration.

The  $\overrightarrow{step}_a$  and  $\overrightarrow{step}_b$  represent a step size relative to the uniform distribution in the  $[-a, a]$  and  $[-b, b]$  ranges, respectively.  $a$  and  $b$  are calculated according to Eq. (22 and 23). And the  $T$  value indicates the maximum iteration.

$$a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{t}{T}\right) + 1\right) \quad (22)$$

$$b = 1 - \frac{t}{T} \quad (23)$$

$\vec{X}_A$  and  $\vec{X}_B$  consist of two randomly selected individuals in the  $N$  slime mold. This can create the problem of falling to the local minimum. Here, the ESMA method, which replaces  $\vec{X}_A$  with a position vector from the balance pool consisting of the best four position vectors and takes into account the average position, has been developed. The individual elements of the equilibrium pool are defined as in Eq. (24).

$$\vec{X}_{eq(1)} = X(\operatorname{sortIndex}(1))$$

$$\vec{X}_{eq(2)} = X(\operatorname{sortIndex}(2))$$

$$\vec{X}_{eq(3)} = X(\operatorname{sortIndex}(3)) \quad (24)$$

$$\vec{X}_{eq(4)} = X(\operatorname{sortIndex}(4))$$

$$\vec{X}_{ave} = \frac{\vec{X}_{eq(1)} + \vec{X}_{eq(2)} + \vec{X}_{eq(3)} + \vec{X}_{eq(4)}}{4}$$

Equilibrium pool  $\vec{X}_{eq,pool} = \{\vec{X}_{eq(1)}, \vec{X}_{eq(2)}, \vec{X}_{eq(3)}, \vec{X}_{eq(4)}, \vec{X}_{eq(ave)}\}$  is created using 5 different vectors in Eq. (24). In ESMA, the position vector of the next  $X_i(j = 1, 2, 3, \dots, N)$  is modelled as in Eq. (25).

$$\vec{X}_i(t + 1) = r_1 \cdot (UB - LB) + LB, \text{ when } r_1 < z \quad (25)$$

$$\vec{X}_i(t + 1) = \vec{X}_{Gbest} + \overrightarrow{step}_a (\vec{W} \cdot \vec{X}_{eq} + \vec{X}_B), \text{ when } r_2 < p_i(t) \text{ and } r_1 \geq z$$

$$\vec{X}_i(t + 1) = \overrightarrow{step}_b \cdot \vec{X}_i(t), \text{ when } r_2 \geq p_i(t) \text{ and } r_1 \geq z$$

## Results and Discussion

In the study, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) 2020 test functions were selected to analyze the performance of SMA, LSMA, and ESMA methods [14]. The CEC2020 test functions consist of 10 different test functions. The first is the unimodal Shifted and Rotated Bent Cigar function. The second, third, and fourth functions are the multimodal functions Shifted and Rotated Schwefel's, Shifted and Rotated Lunacek bi-Rastrigin, and Expanded Rosenbrock's plus Griewangk's function, respectively [15]. In addition, there are 3 different hybrids and 3 different composition functions with  $N$  values of 3, 4,

and 5, respectively. The names and equations of these functions are listed in Table 1. Unimodal functions play a decisive role in the convergence performance of algorithms. Multimodal functions are used to see if there are problems with early convergence and local optimization in an algorithm.

On the other hand, hybrid and composition functions, are used to determine the performance of algorithms' ability to avoid local optima and their balance between discovery and exploitation, as they have many local optima. Experiments in the study were carried out on a computer with the Windows 10 operating system, 32 GB RAM, and a CPU of Intel (R) core i9-10900k (3.7 GHz). In the study, the special parameters of the SMA, LSMA, and ESMA algorithms were taken exactly the same as in the original articles. In order to make a fair evaluation under equal conditions, the number of iterations was 1000 and all experiments were run 20 times. In addition, the performances of the algorithms in 3 different dimension values were compared by taking the dimension as 5, 10 and 20.

### Hybrid Functions

$$F(x) = g_1(M_1z_1) + g_2(M_2z_2) + \dots + g_N(M_Nz_N) + F^*(x)$$

$F(x)$ : Hybrid function

$g_i(x)$ :  $i^{th}$  basic function used to construct the hybrid function

$N$ : Number of basic functions

$$z = [z_1, z_2, \dots, z_N]$$

$$z_1 = [$$

$$y = x - o_i, S = \operatorname{randperm}(1: D)$$

$p_i$  = Used to control the percentage of  $g_i(x)$

$$n_i = \text{Dimension for each basic function} \quad \sum_{i=1}^N n_i = D$$

$$n_1 = [p_1D], n_2 = [p_2D], \dots, n_{N-1} = [p_{N-1}D],$$

$$n_N = D - \sum_{i=1}^{N-1} n_i$$

### Composition Functions

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \{w_i^* [\lambda_i g_i(x) + bias_i]\} + F^*$$

$F(x)$ : Composition function

$g_i(x)$ :  $i^{th}$  basic function used to construct the composition function

$N$ : Number of basic functions

$o_i$ : New shifted optimum position for each  $g_i(x)$ , define the global and local optima' s position

$bias_i$ : defines which optimum is global optimum  $\sigma_i$ : used to control each  $g_i(x)$ ' s coverage range, a small  $\sigma_i$  gives a narrow range for that  $g_i(x)$

$\lambda_i$ : used to control each  $g_i(x)$ 's height

Then normalize the weight  $\omega_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i$

$w_i$ : weight value for  $g_i(x)$ , calculated as below:

So when  $x = o_i$ ,  $\omega_j = \begin{cases} 1, & j = i \\ 0, & j \neq i \end{cases}$  for  $j = 1, 2, \dots, N, f(x) = bias_i + f^*$

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^D (x_j - o_j)^2}} \exp\left(-\frac{\sum_{j=1}^D (x_j - o_j)^2}{2D\sigma_1^2}\right)$$

Table 1. CEC'2020 test functions and equations

No	Function Name	Equation	F1*
F1	Shifted and Rotated Bent Cigar Function	$F1 = x_1^2 + 10^6 \sum_{i=2}^D x_i^2$ $F1(M(x - o_1)) + F1^*$	100
F2	Shifted and Rotated Schwefel's Function	$f(x) = 418.9829 \times D - \sum_{i=1}^D g(z_i)$ $z_i = x_i + 4.209687462275036e + 002$ $g(z_i) = \begin{cases} z_i \sin( z_i ^{\frac{1}{2}}), & \text{if }  z_i  \leq 500 \\ 500 - \text{mod}(z_i, 500) \sin(\sqrt{ 500 - \text{mod}(z_i, 500) } - \frac{(z_i - 500)^2}{10000d}), & \text{if } z_i > 500 \\ (\text{mod}( z_i , 500) - 500) \sin(\sqrt{ \text{mod} z_i , 500} - 500 } - \frac{(z_i + 500)^2}{10000d}), & \text{if } z_i < -500 \end{cases}$ $F2(x) = f\left(M\left(\frac{1000(x - o_2)}{100}\right)\right) + F2^*$	1100
F3	Shifted and Rotated Lunacek bi-Rastrigin Function	$f(x) = \min\left(\sum_{i=1}^D (\hat{x}_i - \mu_0)^2, dD + s \sum_{i=1}^D (\hat{x}_i - \mu_0)^2\right) + 10\left(D - \sum_{i=1}^D \cos(2\pi z_i)\right)$ $\mu_0 = 2.5, \mu_1 = \sqrt{\frac{\mu_0^2 - d}{s}}, s = 1 - \frac{1}{2\sqrt{D} + 20 - 8.2}, d = 1$ $y = \frac{10(x - o)}{100}, \hat{x}_i = 2\text{sign}(x_i^*)y_i + \mu_0, \text{ for } i = 1, 2, \dots, D$ $z = \bigwedge_{i=1}^{100} (\hat{x} - \mu_0)$ $F3(x) = f\left(M\left(\frac{600(x - o_3)}{100}\right)\right) + F3^*$	700
F4	Expanded Rosenbrock's plus Griewangk's Function	$f1(x) = \sum_{i=1}^{D-1} (100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (x_i - 1)^2)$ $f2(x) = \sum_{i=1}^D \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$ $f4 = f2(f1(x_1, x_2)) + f2(f1(x_2, x_3)) + \dots + f2(f1(x_{D-1}, x_D)) + f2(f1(x_D, x_1)) + f4^*$	1900
F5	Hybrid Function 1 (N = 3)	$N = 3, p = [0.3, 0.3, 0.4]$ <p><i>g1: Modified Schwefel's Function, g2: Rastrigin's Function, g3: High Conditioned Elliptic Function</i></p>	1700
F6	Hybrid Function 2 (N = 4)	$N = 4, p = [0.2, 0.2, 0.3, 0.3]$ <p><i>g1: Expanded Schaffer Function, g2: HGBat Function, g3: Rosenbrock's Function, g4: Modified Schwefel's Function</i></p>	1600
F7	Hybrid Function 3 (N = 5)	$N = 5, p = [0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.3]$ <p><i>g1: Expanded Schaffer Function, g2: HGBat Function, g3: Rosenbrock's Function, g4: Modified Schwefel's Function, g5: High Conditioned Elliptic Function</i></p>	2100
F8	Composition Function 1 (N = 3)	$N = 3, \sigma = [10, 20, 30], \lambda = [1, 10, 1], bias = [0, 100, 200]$ <p><i>g1: Rastrigin's Function, g2: Griewank's Function, g3: Modified Schwefel's Function</i></p>	2200
F9	Composition Function 2 (N = 4)	$N = 4, \sigma = [10, 20, 30, 40], \lambda = [10, 1e - 6, 10, 1], bias = [0, 100, 200, 300]$ <p><i>g1: Ackley's Function, g2: High Conditioned Elliptic Function, g3: Griewank's Function, g4: Rastrigin's Function</i></p>	2400
F10	Composition Function 3 (N = 5)	$N = 5, \sigma = [10, 20, 30, 40, 50], \lambda = [10, 1, 10, 1e - 6, 1], bias = [0, 100, 200, 300, 400]$ <p><i>g1: Rastrigin's Function, g2: Happycat Function, g3: Ackley's Function, g4: Discus Function, g5: Rosenbrock's Function</i></p>	2500

Table 2, Table 3 and Table 4 show the results according to dimensions 5, 10, and 20, respectively. Average (Avg.), standard deviation (Std.) and minimum (Min.) values are given in the tables. In addition, for ease of reading, the best values found in each test function are made in bold.

Table 2. dim 5

Functions	Alg.	Metrics		
		Avg.	Std.	Min.
F1	SMA	<b>4.51E+03</b>	<b>5.33E+03</b>	1.23E+02
	LSMA	6.01E+03	5.59E+03	1.54E+02
	ESMA	5.20E+03	5.80E+03	<b>1.04E+02</b>
F2	SMA	1.22E+03	1.02E+02	1.13E+03
	LSMA	<b>1.21E+03</b>	<b>8.38E+01</b>	<b>1.11E+03</b>
	ESMA	1.24E+03	1.01E+02	1.13E+03
F3	SMA	7.08E+02	<b>1.79E+00</b>	7.05E+02
	LSMA	7.09E+02	2.16E+00	7.03E+02
	ESMA	<b>7.07E+02</b>	2.42E+00	<b>7.02E+02</b>
F4	SMA	<b>1.90E+03</b>	<b>1.31E-01</b>	<b>1.90E+03</b>
	LSMA	<b>1.90E+03</b>	1.38E-01	<b>1.90E+03</b>
	ESMA	<b>1.90E+03</b>	<b>1.31E-01</b>	<b>1.90E+03</b>
F5	SMA	1.72E+03	1.25E+01	<b>1.70E+03</b>
	LSMA	1.83E+03	6.83E+01	1.71E+03
	ESMA	<b>1.71E+03</b>	<b>9.52E+00</b>	<b>1.70E+03</b>
F6	SMA	<b>1.60E+03</b>	2.53E-01	<b>1.60E+03</b>
	LSMA	<b>1.60E+03</b>	3.14E-01	<b>1.60E+03</b>
	ESMA	<b>1.60E+03</b>	<b>2.27E-01</b>	<b>1.60E+03</b>
F7	SMA	<b>6.55E+04</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>6.55E+04</b>
	LSMA	<b>6.55E+04</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>6.55E+04</b>
	ESMA	<b>6.55E+04</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>6.55E+04</b>
F8	SMA	2.21E+03	6.28E+00	<b>2.20E+03</b>
	LSMA	<b>2.20E+03</b>	<b>5.66E+00</b>	<b>2.20E+03</b>
	ESMA	2.23E+03	3.87E+01	<b>2.20E+03</b>
F9	SMA	2.58E+03	4.51E+01	<b>2.50E+03</b>
	LSMA	<b>2.56E+03</b>	5.14E+01	<b>2.50E+03</b>
	ESMA	2.58E+03	<b>4.17E+01</b>	<b>2.50E+03</b>
F10	SMA	<b>2.85E+03</b>	1.32E-02	2.85E+03
	LSMA	<b>2.85E+03</b>	1.06E+01	<b>2.80E+03</b>
	ESMA	<b>2.85E+03</b>	<b>1.13E-02</b>	2.85E+03

Table 3. dim 10

Functions	Alg.	Metrics		
		Avg.	Std.	Min.
F1	SMA	7.18E+03	4.57E+03	9.55E+02
	LSMA	7.03E+03	4.93E+03	<b>1.02E+02</b>
	ESMA	<b>6.37E+03</b>	4.72E+03	3.01E+02
F2	SMA	1.66E+03	2.38E+02	<b>1.23E+03</b>
	LSMA	1.69E+03	2.12E+02	1.24E+03
	ESMA	<b>1.64E+03</b>	<b>1.59E+02</b>	1.33E+03
F3	SMA	7.29E+02	<b>8.05E+00</b>	<b>7.15E+02</b>
	LSMA	7.30E+02	1.04E+01	7.16E+02
	ESMA	<b>7.28E+02</b>	8.23E+00	7.17E+02
F4	SMA	<b>1.90E+03</b>	<b>4.50E-01</b>	<b>1.90E+03</b>
	LSMA	<b>1.90E+03</b>	7.25E-01	<b>1.90E+03</b>
	ESMA	<b>1.90E+03</b>	5.14E-01	<b>1.90E+03</b>
F5	SMA	<b>7.98E+03</b>	<b>6.41E+03</b>	<b>1.86E+03</b>
	LSMA	1.01E+04	6.63E+03	2.50E+03
	ESMA	1.73E+04	1.82E+04	1.90E+03
F6	SMA	<b>1.60E+03</b>	2.70E-01	<b>1.60E+03</b>

Functions	Alg.	Metrics		
		Avg.	Std.	Min.
F7	LSMA	<b>1.60E+03</b>	2.99E-01	<b>1.60E+03</b>
	ESMA	<b>1.60E+03</b>	<b>2.43E-01</b>	<b>1.60E+03</b>
	SMA	1.01E+04	8.46E+03	<b>2.28E+03</b>
F8	LSMA	5.93E+03	<b>4.41E+03</b>	2.65E+03
	ESMA	<b>5.35E+03</b>	4.81E+03	2.17E+03
	SMA	2.39E+03	3.13E+02	<b>2.20E+03</b>
F9	LSMA	<b>2.75E+03</b>	<b>8.60E+00</b>	2.74E+03
	ESMA	<b>2.75E+03</b>	5.82E+01	<b>2.50E+03</b>
	SMA	2.76E+03	9.43E+00	2.74E+03
F10	LSMA	<b>2.93E+03</b>	<b>2.62E+01</b>	<b>2.90E+03</b>
	ESMA	<b>2.93E+03</b>	2.67E+01	<b>2.90E+03</b>
	SMA	2.94E+03	3.16E+01	<b>2.90E+03</b>

Table 4. dim 20

Functions	Alg.	Metrics		
		Avg.	Std.	Min.
F1	SMA	6.31E+03	4.10E+03	<b>1.46E+02</b>
	LSMA	<b>5.07E+03</b>	4.12E+03	1.49E+02
	ESMA	7.85E+03	<b>3.81E+03</b>	2.91E+02
F2	SMA	1.94E+03	<b>2.74E+02</b>	1.54E+03
	LSMA	2.95E+03	6.14E+02	2.02E+03
	ESMA	<b>1.93E+03</b>	3.06E+02	<b>1.50E+03</b>
F3	SMA	7.52E+02	1.00E+01	7.38E+02
	LSMA	7.88E+02	1.96E+01	7.53E+02
	ESMA	<b>7.46E+02</b>	<b>9.71E+00</b>	<b>7.31E+02</b>
F4	SMA	<b>1.90E+03</b>	1.06E+00	<b>1.90E+03</b>
	LSMA	<b>1.90E+03</b>	1.42E+00	<b>1.90E+03</b>
	ESMA	<b>1.90E+03</b>	<b>1.01E+00</b>	<b>1.90E+03</b>
F5	SMA	4.22E+05	3.18E+05	1.81E+04
	LSMA	4.34E+05	2.64E+05	8.05E+04
	ESMA	<b>3.38E+05</b>	<b>2.32E+05</b>	<b>4.29E+04</b>
F6	SMA	<b>2.05E+03</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>2.05E+03</b>
	LSMA	<b>2.05E+03</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>2.05E+03</b>
	ESMA	<b>2.05E+03</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>2.05E+03</b>
F7	SMA	4.20E+05	3.66E+05	5.40E+03
	LSMA	2.00E+05	2.35E+05	1.08E+04
	ESMA	<b>1.91E+05</b>	<b>2.06E+05</b>	<b>5.41E+03</b>
F8	SMA	3.24E+03	<b>1.12E+03</b>	<b>2.30E+03</b>
	LSMA	3.30E+03	1.28E+03	<b>2.30E+03</b>
	ESMA	<b>2.94E+03</b>	1.16E+03	<b>2.30E+03</b>
F9	SMA	2.86E+03	<b>1.62E+01</b>	2.84E+03
	LSMA	2.86E+03	1.93E+01	2.84E+03
	ESMA	<b>2.85E+03</b>	<b>1.62E+01</b>	<b>2.82E+03</b>
F10	SMA	2.93E+03	2.81E+01	<b>2.91E+03</b>
	LSMA	2.93E+03	3.06E+01	<b>2.91E+03</b>
	ESMA	<b>2.91E+03</b>	<b>1.10E+00</b>	<b>2.91E+03</b>

When Table 2 is examined, it is seen that the methods give the same average in 4 of the 10 test functions. While LSMA gave the best average in 3 functions, ESMA gave the best average in 2 functions. SMA, on the other hand, gave the best average in only one function. The convergence curve and boxplot graphics according to Dimension 5 are given in Figure 1 and Figure 2, respectively.

When Table 3 is examined, it is seen that the methods give the same average in 2 of the 10 test functions. It was seen that LSMA and ESMA gave the best average in 3 functions. While ESMA gave the best average in 4 functions, SMA gave the best average in 1 of them. The convergence curve and boxplot graphics according to Dimension 10 are given in Figure 3 and Figure 4, respectively.

When Table 4 is examined, it is seen that the methods give the same average in 2 of the 10 test functions. While ESMA gave the best average in 7 functions, LSMA gave the best result in only 1 of them. The convergence curve and boxplot graphics according to Dimension 20 are given in Figure 5 and Figure 6, respectively.

In Table 5, the algorithm or algorithms that give the best value for each test function in different dimensions according to the average value are given. When Table 5 is examined, it is seen that the performance of the methods varies according to the dimension in unimodal functions. In multimodal functions, it was seen that ESMA achieved a better mean value. It has been observed that ESMA gives relatively better results than other methods in hybrid functions. Considering the composite functions, LSMA gave the best average value when the dimension was taken as 5. When the dimension is taken as 10, it is seen that the performances of LSMA and ESMA are the same. Finally, it

is seen that ESMA gives better performance when the dimension is taken as 20. In the light of these experimental results, it has been seen that the ESMA method outperforms the other methods, SMA and LSMA, in CEC2020 functions.

Table 5. Best algorithm or algorithms according to the average value

Functions	Dimension (5)	Dimension (10)	Dimension (20)
f1	SMA	ESMA	LSMA
f2	LSMA	ESMA	ESMA
f3	ESMA	ESMA	ESMA
f4	ALL	ALL	ALL
f5	ESMA	SMA	ESMA
f6	ALL	ALL	ALL
f7	ALL	ESMA	ESMA
f8	LSMA	LSMA and ESMA	ESMA
f9	LSMA	LSMA and ESMA	ESMA
f10	ALL	LSMA and ESMA	ESMA

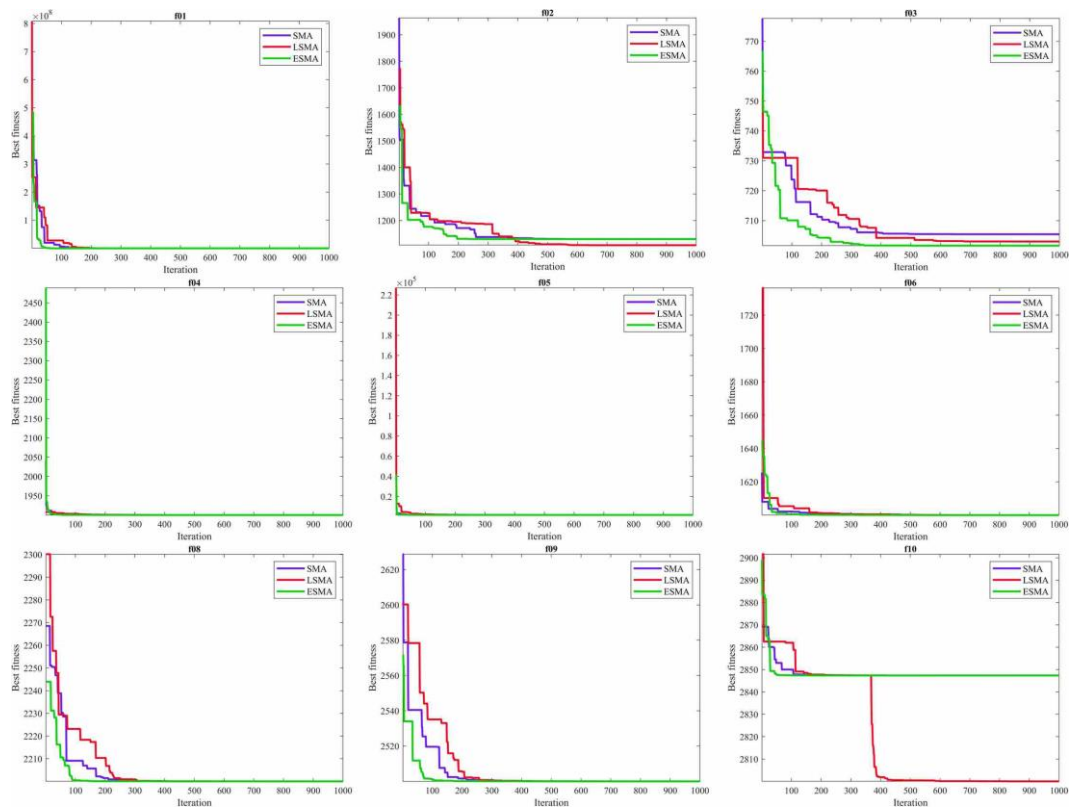


Figure 1. Convergence curve of the compared methods when dimension 5

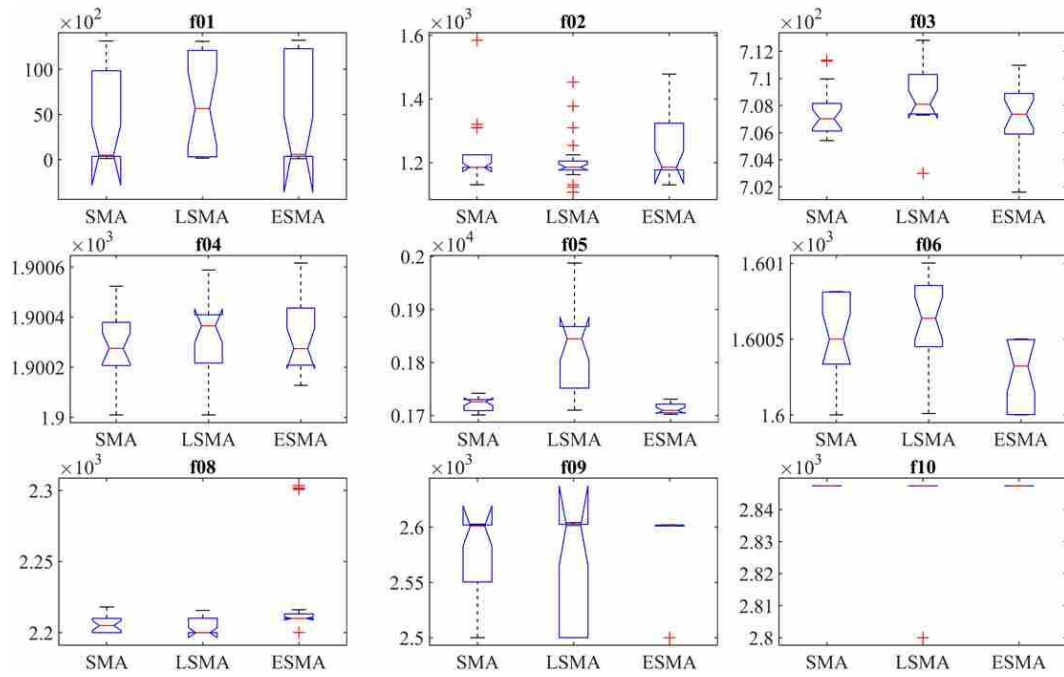


Figure 2. Boxplot of the compared methods when dimension 5

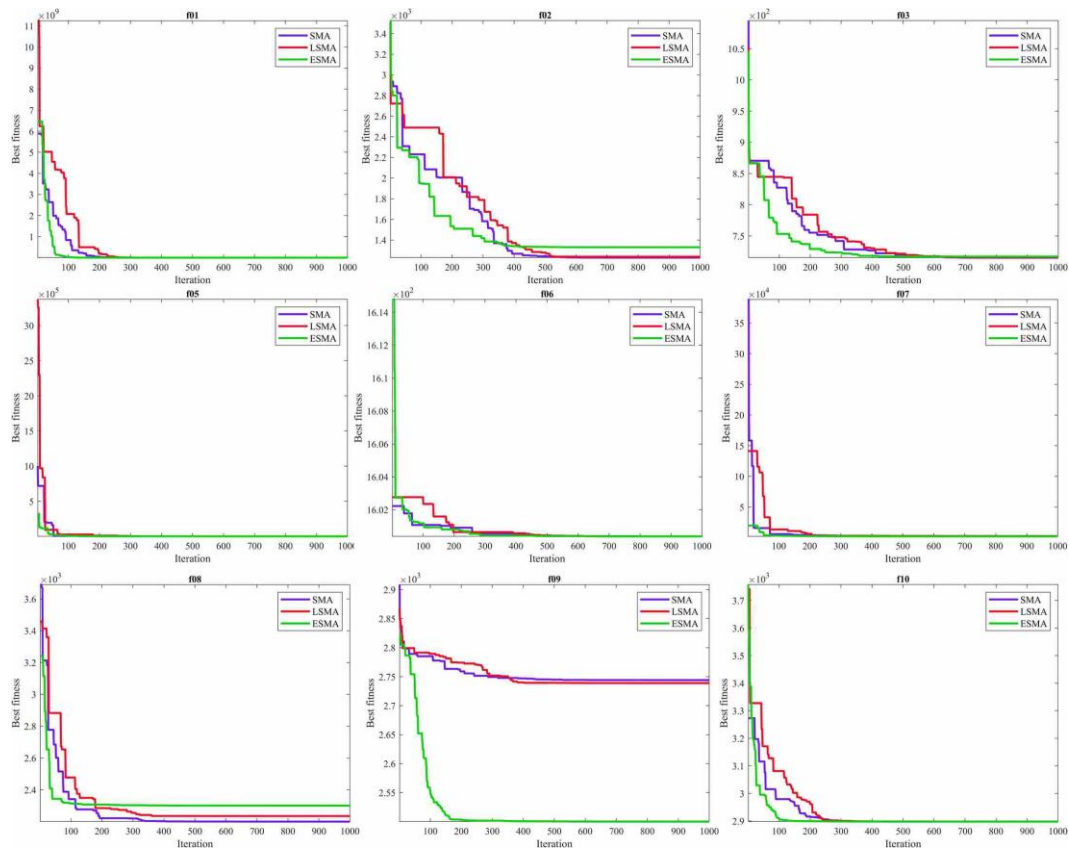


Figure 3. Convergence curve of the compared methods when dimension 10

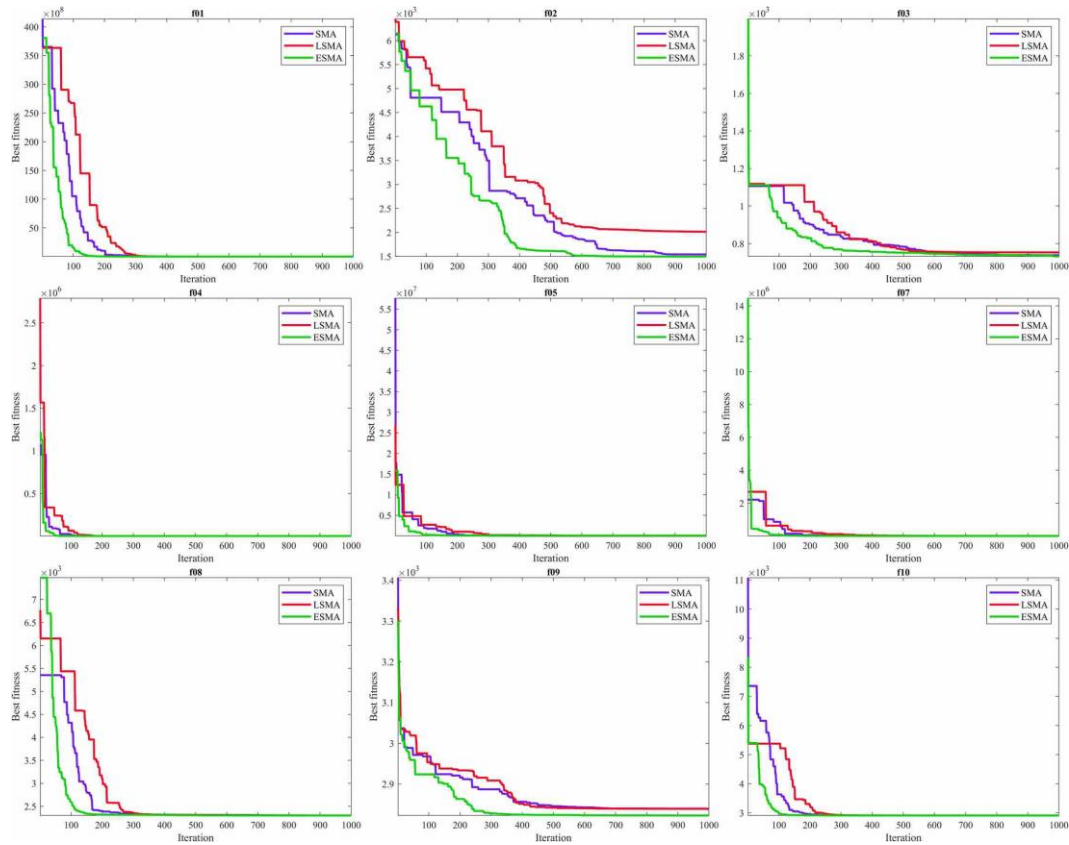


Figure 4. Boxplot of the compared methods when dimension 10

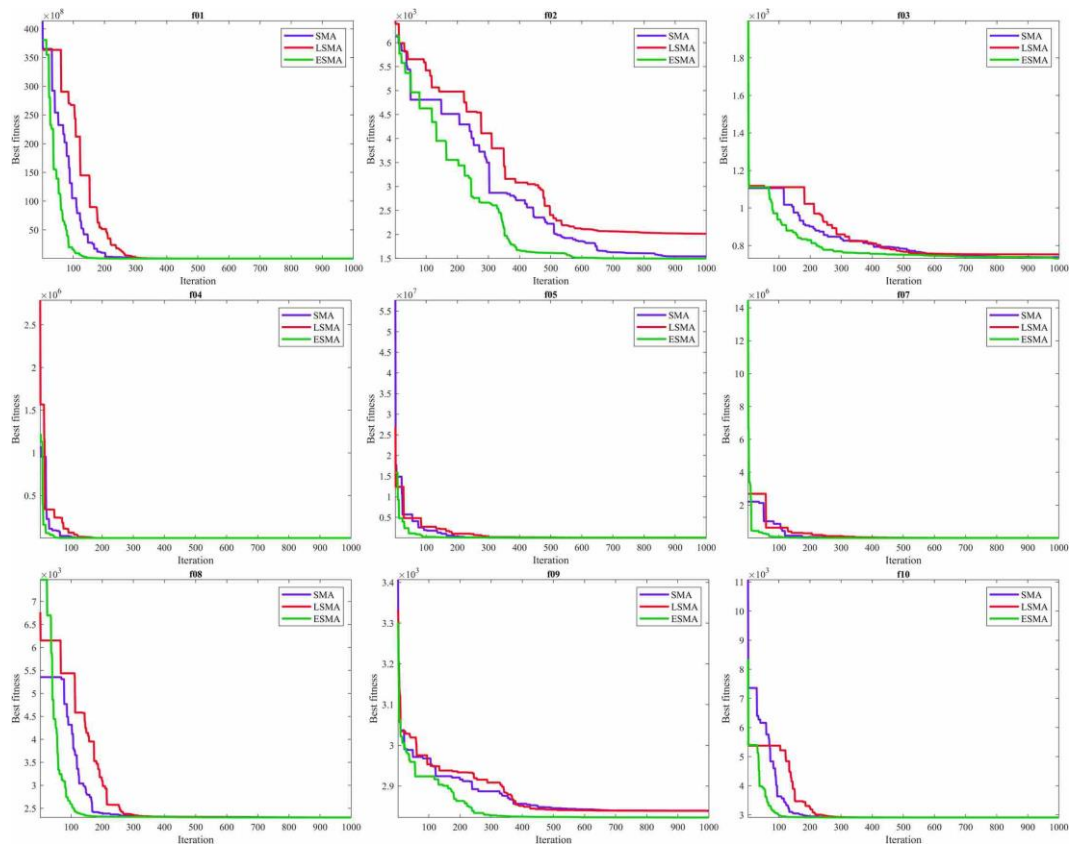


Figure 5. Convergence curve of the compared methods when dimension 10

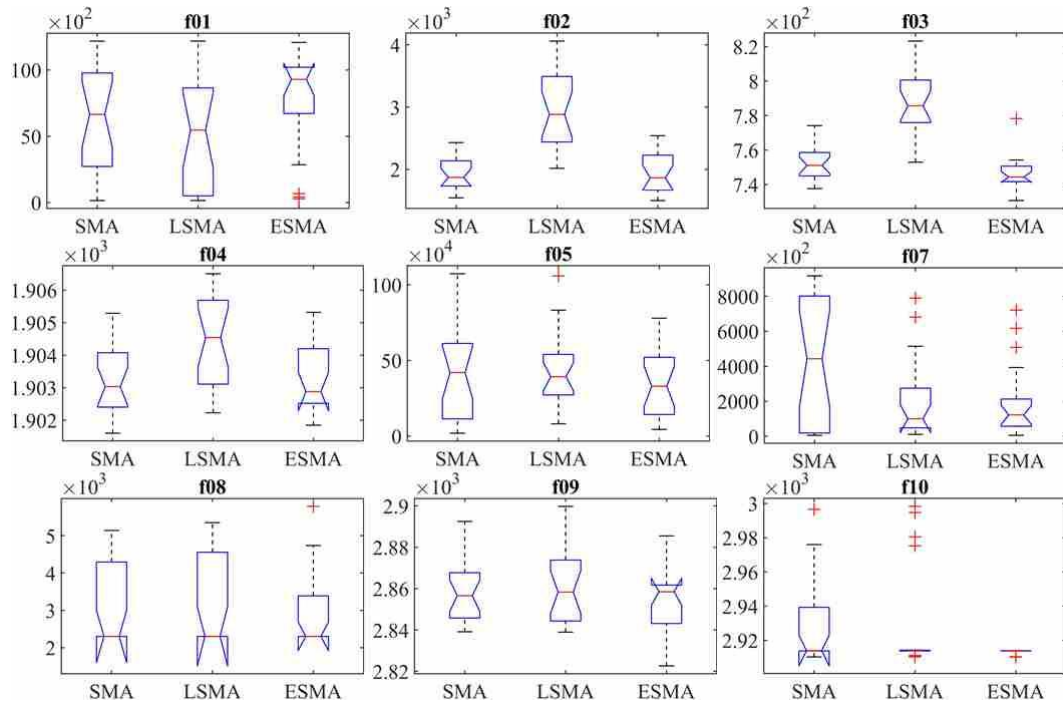


Figure 6. Boxplot of the compared methods when dimension 2

## Conclusions

Metaheuristic methods have been used successfully in the literature for solving different problems. As the literature studies show, there is no method that gives the best performance for each problem. This increases the interest of the researchers in this subject. For this reason, it is aimed to find the best method by suggesting different hybrid versions of the newly introduced methods to the literature. In this study, performance analyses were made by running different hybrid versions of the SMA method, which has been proposed in recent years, in the CEC 2020 test functions under equal conditions. The experimental results showed that ESMA performed better than the standard SMA and LSMA. This study is significant both for making it easier for researchers to access one of the most recent metaheuristic optimization algorithms, SMA, and its variants, as well as for assisting them in selecting the best algorithm by providing a preliminary idea about the performance of metaheuristic algorithms that they can use in their studies.

## References

- [1] Sayed, G.I., Khoriba, G., Haggag, M.H.: A novel chaotic salp swarm algorithm for global optimization and feature selection. *Appl. Intell.* 48, 3462–3481 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1158-6>.
- [2] Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A.: Grey Wolf Optimizer. *Adv. Eng. Softw.* 69, 46–61 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- [3] Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B., Mirjalili, S.: Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. *Knowledge-Based Syst.* 191, 105190 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105190>.
- [4] Hashim, F.A., Hussain, K., Houssein, E.H., Mabrouk, M.S., Al-Atabany, W.: Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Appl. Intell.* 51, 1531–1551 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>.
- [5] Dhiman, G., Kaur, A.: Spotted Hyena Optimizer for Solving Engineering Design Problems. *Proc. - 2017 Int. Conf. Mach. Learn. Data Sci. MLDS 2017.* 2018-Janua, 114–119 (2018). <https://doi.org/10.1109/MLDS.2017.5>.
- [6] Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A.A., Al-qaness, M.A.A., Gandomi, A.H.: Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm. *Comput. Ind. Eng.* 157, 107250 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107250>.
- [7] Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A.A., Mirjalili, S.: Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Futur. Gener. Comput. Syst.* 111, 300–323 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055>.
- [8] Altay, E.V.: Gerçek dünya mühendislik tasarım problemlerinin çözümünde kullanılan metasezgisel optimizasyon algoritmalarının performanslarının incelenmesi. *International Journal of Innovative Engineering Applications.* 6, 65-74 (2022).
- [9] Fagan, F., Vuuren, J.H. Van: A unification of the prevalent views on exploitation, exploration, intensification and diversification. *Int. J. Metaheuristics.* 2, 294 (2013).

- <https://doi.org/10.1504/ijmheur.2013.056407>.
- [10] Thangaraj, R., Pant, M., Abraham, A., Bouvry, P.: Particle swarm optimization: Hybridization perspectives and experimental illustrations. *Appl. Math. Comput.* 217, 5208–5226 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.12.053>.
- [11] Naik, M.K., Panda, R., Abraham, A.: Normalized square difference based multilevel thresholding technique for multispectral images using leader slime mould algorithm. *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.10.030>.
- [12] Naik, M.K., Panda, R., Abraham, A.: An entropy minimization based multilevel colour thresholding technique for analysis of breast thermograms using equilibrium slime mould algorithm. *Appl. Soft Comput.* 113, 107955 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107955>.
- [13] Altay, O.: Chaotic slime mould optimization algorithm for global optimization. Springer Netherlands (2022). <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10100-5>.
- [14] Mohamed, A.W., Hadi, A.A., Mohamed, A.K., Awad, N.H.: Evaluating the Performance of Adaptive GainingSharing Knowledge Based Algorithm on CEC 2020 Benchmark Problems. 2020 IEEE Congr. Evol. Comput. CEC 2020 - Conf. Proc. (2020). <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185901>.
- [15] Varol Altay, E., Altay, O.: Güncel metasezgisel optimizasyon algoritmalarının CEC2020 test fonksiyonları ile karşılaştırılması. *DÜMF Mühendislik Derg.* 5, 729–741





## Automated Detection of Alzheimer's Disease using raw EEG time series via. DWT-CNN model

Mesut ŞEKER<sup>1\*</sup>, Mehmet Sıraç ÖZERDEM<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dicle University, Electrical-Electronics Engineering Department, mesut.seker@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-9245-6790

<sup>2</sup> Dicle University, Electrical-Electronics Engineering Department, sozerdem@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9368-8902

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 24 October 2022  
Received in revised form 2 December 2022  
Accepted 5 December 2022  
Available online 31 December 2022

#### Keywords:

Deep Learning, Alzheimer's Disease, CNN, EEG, disease detection

Doi: 10.24012/dumf.1197722

\* Corresponding author

### ABSTRACT

Dementia is an age-related neurological disease and gives rise to profound cognitive decline in patients' life. Alzheimer's Disease (AD) is the progression of dementia and AD patients generally have memory loss and behavioral disorders. It is possible to determine the stage of dementia by developing automated systems via. signals obtained from patients. EEG is a popular brain monitoring system due to its cost effective, non-invasive implementation, and higher time resolution. In current study, we include participants of 24 HC (12 eyes open (EO), 12 eyes closed (EC)), and 24 AD (12 eyes open (EO), 12 eyes closed (EC)). The aim of current study is to design a practical AD detection tool for AD/HC participants with a model called DWT-CNN. We performed Discrete Wavelet Transform (DWT) to extract EEG sub-bands. A Conv2D architecture is applied to raw samples of related EEG sub-bands. According to obtained performance metrics calculated from confusion matrices, all AD and HC time series are correctly classified for alpha band and full band range under both EO and EC. Classification rate of AD vs. HC increases under EO state in all cases even if EC is commonly preferred in other studies. We will add MCI patients with equal size and similar demographics and repeat the experimental steps to develop early alert system in future studies. Adding more participants will also increase generalization ability of method. It is also promising study to combine EEG with different modalities (2D TF image conversion, or MRI) in a multimodal approach.

## Introduction

Dementia is an age-related neurological disease and gives rise to profound cognitive decline in daily routine. It ultimately causes death owing to inadequate health care service and symptom attenuating medications [1]. It has been reported that 47 million patients are suffering from dementia in worldwide and number of patients is approximated as 131.3 million by 2050. Moreover, the global healthcare expenses of dementia accounts for 818 billion USD per year, and this cost is continuously increasing [2]. Early diagnosis may decrease this treatment cost. Alzheimer's Disease (AD) is the progression of dementia and AD patients generally have memory loss, behavioral disorders and even there is noticeably change in their shape and size of brain compared to controls [3].

Neurofibrillary tangles and amyloid plaques in the cerebral cortex are some of anatomical reasons behind AD. It is possible to determine the stage of dementia by evaluating biomarkers obtained from patients, but this process is expensive, invasive and requires more expertise and specialized centers [4]. Electroencephalography (EEG) has gained popularity for brain monitoring system due to its cost effective, non-invasive implementation, and higher time resolution [5]. The distinctive effects of dementia of human

brain are assumed as follows: decreased complexity, slowing EEG fluctuation, and reduced synchronization in EEG dynamics [6]. In other words, dementia causes less neurons interacting each other, lower cortical connection, and higher linearity in EEG behaviors. In addition, EEG shows lower amplitude in fast frequencies, and higher amplitude in slow frequencies [7]. It can be deduced that EEG's amplitude itself gives clues for content of data. It is crucial to develop an automated detection system learning from data samples without any feature engineering, and non-linear analysis.

We can collect feature engineering under 4 sub-sections in terms of EEG: time domain features, frequency domain features (obtained from Fourier and Wavelet analysis), spatial features (2D topographical maps), and connectivity values calculated between different electrodes. EEG serves high time resolution, and we can directly utilize raw time series records as input vectors of machine learning methods. Deep architectures have become the frontiers approach for establishing diagnostic models based on neurological data. Data from different participant groups feed networks as input sets to train an automated deep architecture.

Many studies have performed binary, and multi-way classification to develop a diagnostic tool for dementia. Bi and Wang (2019) extracted 2D colored spectral topographical maps including 4 Healthy Conditions (HC), 4 Mild Cognitive Impairment (MCI), and 4 AD [8]. MCI is conversion stage from HC to AD, and it is crucial to include MCI patients in experiments. They proposed Spike Convolutional Deep Boltzmann Machine as machine learning architecture and obtained 95% acc. for 3-way classification. Kim and Kim (2018) calculated Relative Power features from 10 MCI patients with 10 HC and implemented Deep Neural Network with 4 hidden layer [9]. They achieved 75% acc. for MCI vs. HC classification task. Ieracitano et al.(2019) used 2D grayscale Periodogram images as input sets for CNN with 1 hidden layer [10]. They collected dataset from 63 AD, 63 MCI with same number of HCs. They performed 2-way (AD vs. HC: 91% , AD vs. MCI: 84% , MCI vs. HC : 92%), and multi-class method (AD vs. MCI vs. HC: 80%) in acc. Morabito et al. (2016) carried out an experiment including 23 HC, 23 MCI, and 23 AD patients and calculated 2D RGB images of Mexican Hat Continuous Wavelet Transform (CWT). They implemented CNN with 2 hidden layers and obtained 82% acc. for 3-way classification. Zhao and He (2015) used raw data of 15 HC and 15 AD participants via. Restricted Boltzmann Machine with 3 hidden layers and achieved 92% acc. for AD vs. HC [11]. J Huggins et al. (2021) calculated 2D RGB Scalogram images of 52 HC, 37 MCI and 52 AD patients with Alex-Net architecture [12]. They yielded 95.51% acc. for 3-way classification. Alvi et al. also used raw EEG data directly to the input of Long-Short Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Units (GRU), k-Nearest Neighbors (k-NN), and Support Vector Machines (SVM) classifier, and obtained highest acc. of 95.51% with GRU [13]. In recent study, we include participants of 24 HC (12 eyes open (EO), 12 eyes closed (EC)), and 24 AD (HC (12 eyes open (EO), 12 eyes closed (EC))). We implemented Discrete Wavelet Transform (DWT) to extract EEG Sub-bands. A Conv2D architecture is applied to raw samples of related EEG sub-bands. We also consider the effects of eye states on discrimination of AD from HC samples. The aim of current study is to design a practical AD detection tool for AD/HC participants with a model called DWT-CNN. We combined both eyes' states to consider the effects on performance metrics within a binary classification task.

The rest of the paper is organized as follows: In material and methods section, we describe dataset, pre-processing protocol, and DWT-CNN architecture. We describe parameters in proposed network. In Results and Discussion section, all related outcomes are given based on illustrations. Study is concluded with conclusion and future work section.

## Materials and Methods

In this section, dataset description, pre-processed steps to construct input tensors, evaluation of method, proposed deep learning architecture, and calculated performance metrics are given. The overall steps followed in proposed study is given in Fig. 1. Input tensors of time series data are created in MATLAB R2021a and stored. The rest of implementation is performed in Spyder (Python 3.9.) with a workstation including 32 GB RAM and 12 GB VRAM NVIDIA GeForce RTX 3060 GPU.

### Dataset

The dataset was acquired by researcher at Florida state University from 19 electrodes ( $F_{p1}, F_{p2}, F_z, F_3, F_4, F_7, F_8, C_z, C_3, C_4, T_3, T_4, P_z, P_3, P_4, T_5, T_6, O_1, \text{ and } O_2$ ) using international 10-20 replacement. Dataset divides into 4 sub-groups: A (HC, EO), B (HC, EC), C (AD, EO), and D (AD, EC). Groups A, and B include 24 HC participants (average age 72, range 61-83) and groups C and D have 24 AD patients (average age 69, range 53-85). Each participant has 8 s length of EEG segment, band range of record is 1-30 Hz, and sampling frequency  $f_s = 128$  Hz. Detailed explanation of dataset can be found in [14].

### Discrete Wavelet Transform

Wavelet Transform (WT) is widely used for time-frequency analysis of biomedical signals and serves practical solutions especially due to EEGs non-stationary, and non-linear behaviors. WT used narrow window functions for high frequencies and wider windows for lower frequencies. Discrete Wavelet Transform uses low pass ( $h(n)$ ) and high pass ( $g(n)$ ) filter pairs for down-sampling process of time series. Approximate (A) and detail (D) are obtained after each down-sampling to obtain low and high frequency components respectively. Same process continues until reaching out desired frequency level. Low pass, and high pass filtering process is given as follows:

$$\varphi_j, k(n) = 2^{j/2} h(2^j n - k) \quad (1)$$

$$\psi_j, k(n) = 2^{j/2} h(2^j n - k) \quad (2)$$

,in which  $n = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ ;  $j = 0, 1, 2, \dots, J - 1$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$ ;  $J = \log_2^M$ , and M is length of the signal. Approximate  $A_i$  and detail  $D_i$  coefficients can be expressed as follows:

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n x(n) \times \varphi_j, k(n) \quad (3)$$

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n x(n) \times \psi_j, k(n) \quad (4)$$

, in which  $k = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$ , and M is length of discrete EEG time series. In current study, 4<sup>th</sup> level DWT with 'db2' is used to obtain delta (< 4 Hz), theta (4-8 Hz), alpha (8-13 Hz), and beta (13-30 Hz).

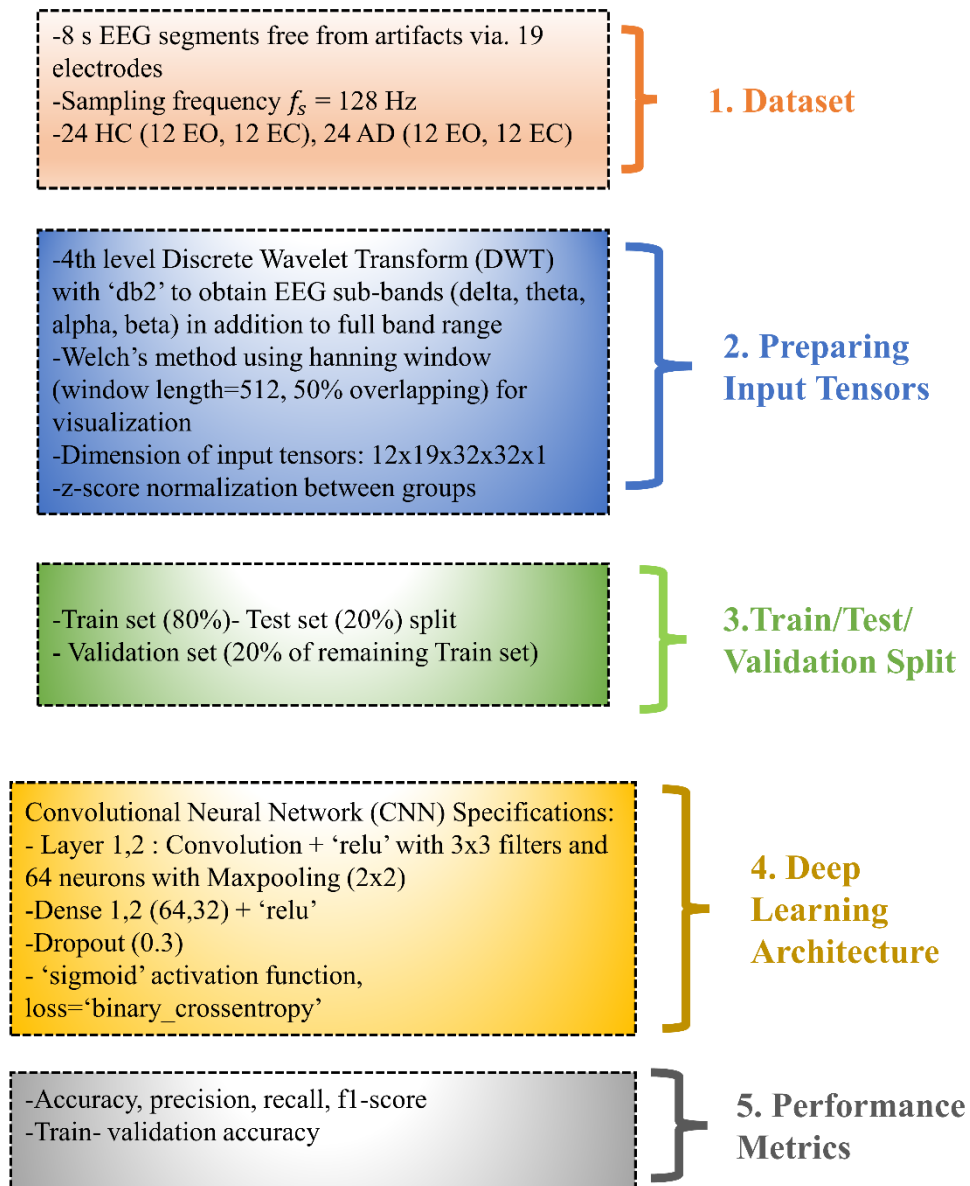


Figure 1. Steps followed in proposed methodology

**Welch’s Method for Power Spectrum Density Visualization**

Welch’s method estimates the power spectrum density (PSD) of a given signal using overlapped segment averaging estimator. Every segments are windowed with window function. PSD estimation is achieved by averaging modified periodograms[15] . *ith* periodogram of a given  $x(n)$  is express as:

$$S_{xx}^{(i)}(f) = \frac{T_s}{K.M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_i(n)w(n)e^{-j2\pi fn} \right|^2 \quad (5)$$

, in which  $f$  is normalized frequency,  $w(n)$  is window function,  $T_s$  is sampling coefficient. Normalization constant  $K$  is defined as:

$$= \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n) \quad (6)$$

To sum up, we calculated *ith* PSD of a signal  $x(n)$  as:

$$P_{welch}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} S_{xx}^{(i)}(f) \quad (7)$$

, where  $L$  refers to lenght of time signal.

In this study, we estimate PSD of EEG sub-bands using ‘Hann’ window with 50% overlapping. Length of window function is selected as 512. We picked up and combined central, temporal, parietal, and occipital electrodes from a randomly selected participant from each class. We excluded frontal electrodes to avoid redundant noises due to eye movements.

**Preparing Input Tensors, and train-test split**

In each class of A, B, C, and D, we equally have 12 participants. Each participants have 8 s record for each of 19 channel. We totally have 12x1024x19 data samples for each class. 1024 length of sample are converted into squared matrices 32x32. Afterwards, each class has 12x19x32x32x1 input tensors. Z-score transform is finally applied to combination of 2 class for data normalization (i.e. data distribution of each column has mean 0 and standard deviation 1). For the validation and evaluation step, we initially divide input data as 80% training and 20% test set. Then, 20% of remaining training set is determined as validation set.

**Conv2D as Deep Learning Architecture**

CNN performs for both feature extraction and classification task simultaneously. Features extracted from raw data automatically using convolution stage, activation function and pooling layers, and classification task is performed via. a fully connected multi-layer neural network. Convolution operation uses the kernels (i.e. filters) and expressed as:

$$Y_j = \sum X_i * K_j + B_j \quad (8)$$

, in which  $B_j$  refers to bias and  $*$  corresponds for convolution operation. Local region  $X_i$  convolves with *jth* filter and it shifts over all input tensor with stride  $s$ . We obtain a feature map  $Y_j$  with size of  $y_1$  and  $y_2$ , expressed as:

$$y_{1,2} = \frac{h-k_{1,2}+2xp}{s} + 1 \quad (9)$$

, where  $p$  is zero padding parameter. An activation function, generally sigmoid or hyperbolic tangent preferred, is used for nonlinear transfer function. ‘ReLU’ has gained popularity due to its better performance for generalization and learning time in CNN architecture. In order to reduce the resolution of input feature vectors, pooling layers haven been utilized. It is important to capture invariant features by using pooling layer. Max-pooling is an effective sub-sampling operator to increase generalization performance and capture important features. Fully connected layer has neurons connected to every unit of previous layers and size of last layer is equal to number of current classes [16].

The proposed architecture of Conv2D is given in Fig. 3. In current study, we implemented 2 convolutional layer + ‘relu’ with 3x3 filters and number of 64 neurons. 2x2 max pooling is used to capture distinct feature and reduce dimension of feature maps. 2 dense layer (64,32) is coming after feature extractor layer and drop out (0.3) is added after dense layers. ‘binary\_crossentropy’ is selected as loss function. We have trained the Conv2D architecture along 100 epochs for classification of AD and HC EEGs.

**Evaluation of Performance Metrics**

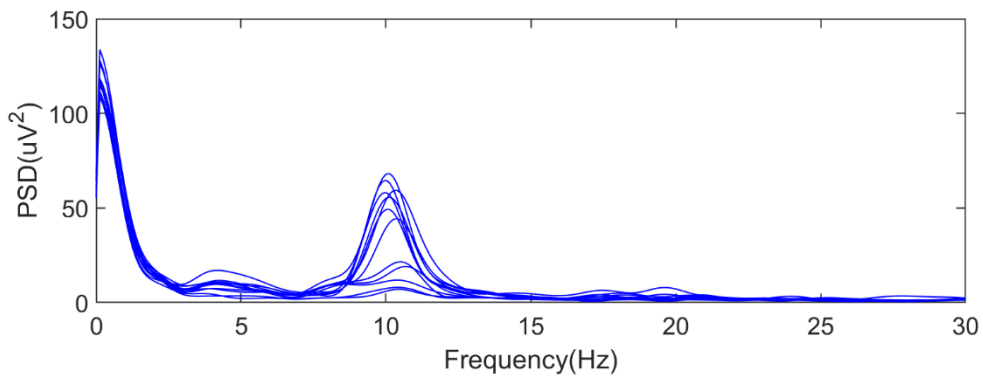
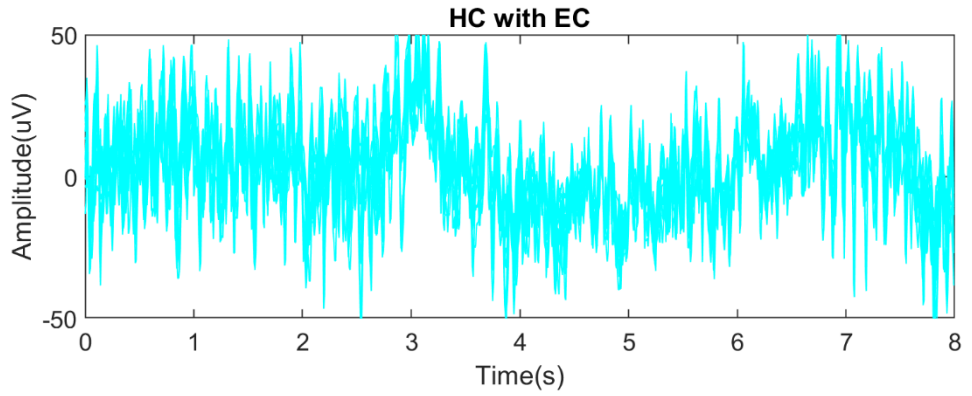
We evaluated many performance metrics estimated from confusion matrices. Accuracy, sensitivity (recall), specificity, precision, and f1-score are calculated for classification purpose. In an ideal classifier, FP and FN should be zero. Moreover, precision and recall values needs to be one. F1-score is a metric that takes precision and recall into account and show trustworthy results. Formulas of performance metrics are given as given below:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN} \quad (10)$$

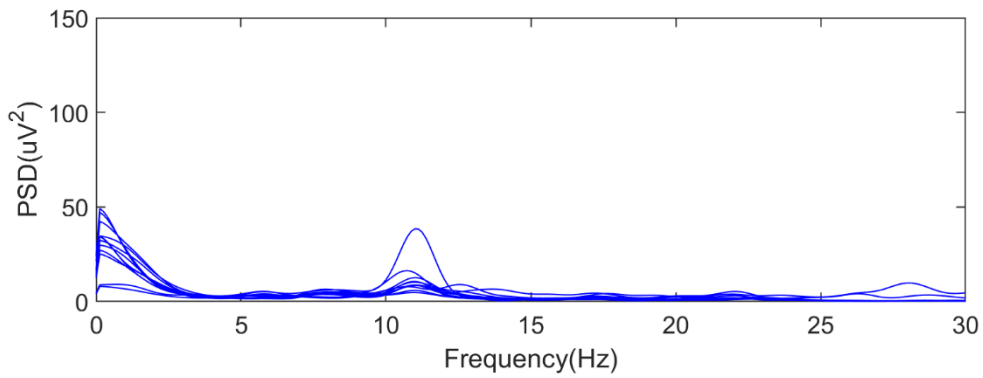
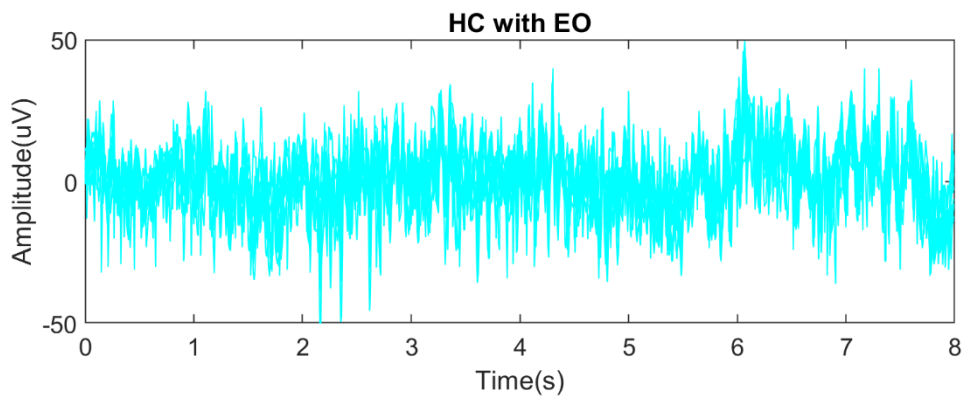
$$Sensitivity (Recall) = \frac{TP}{TP+FN} \quad (11)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (12)$$

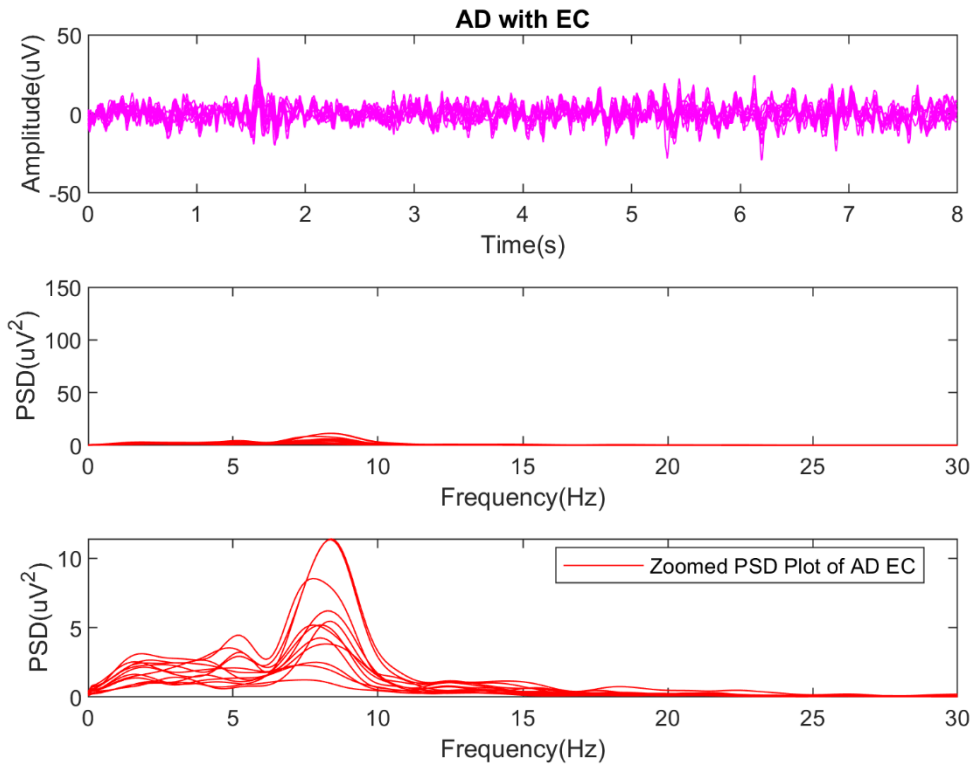
$$F1 - core = 2 * \frac{Precision*Recall}{Precision+Recall} \quad (13)$$



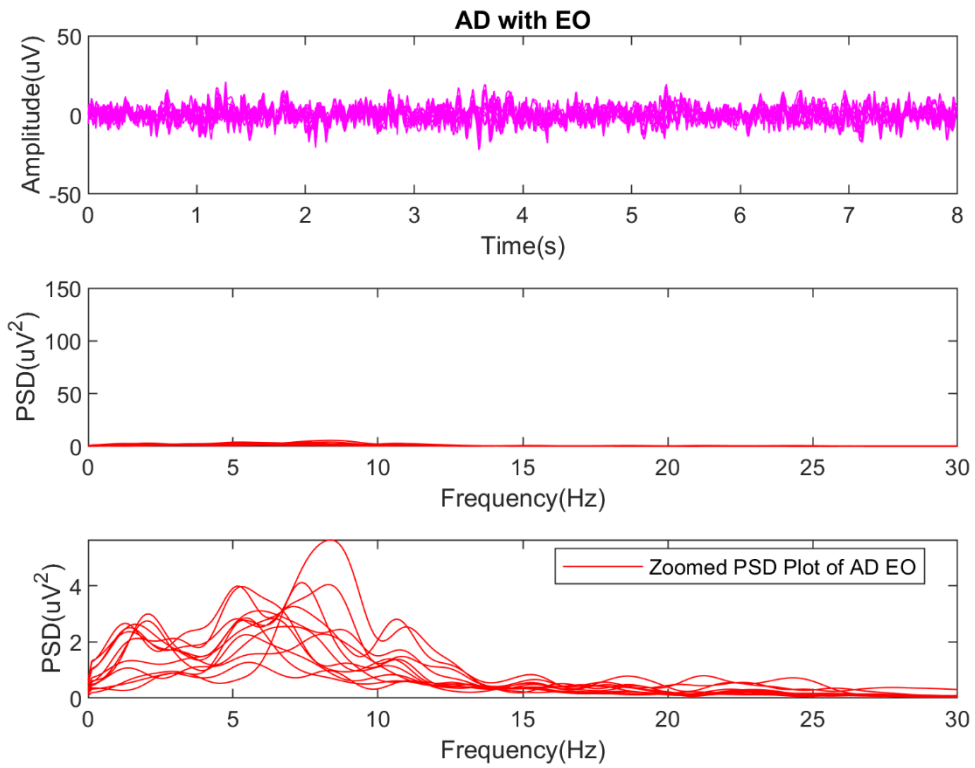
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2. Samples of 8 s EEG records and their (0-30 Hz) PSDs belong to randomly selected participants from (a) HC with EC (b) HC with EO (c) AD with EC and (d) AD with EO classes

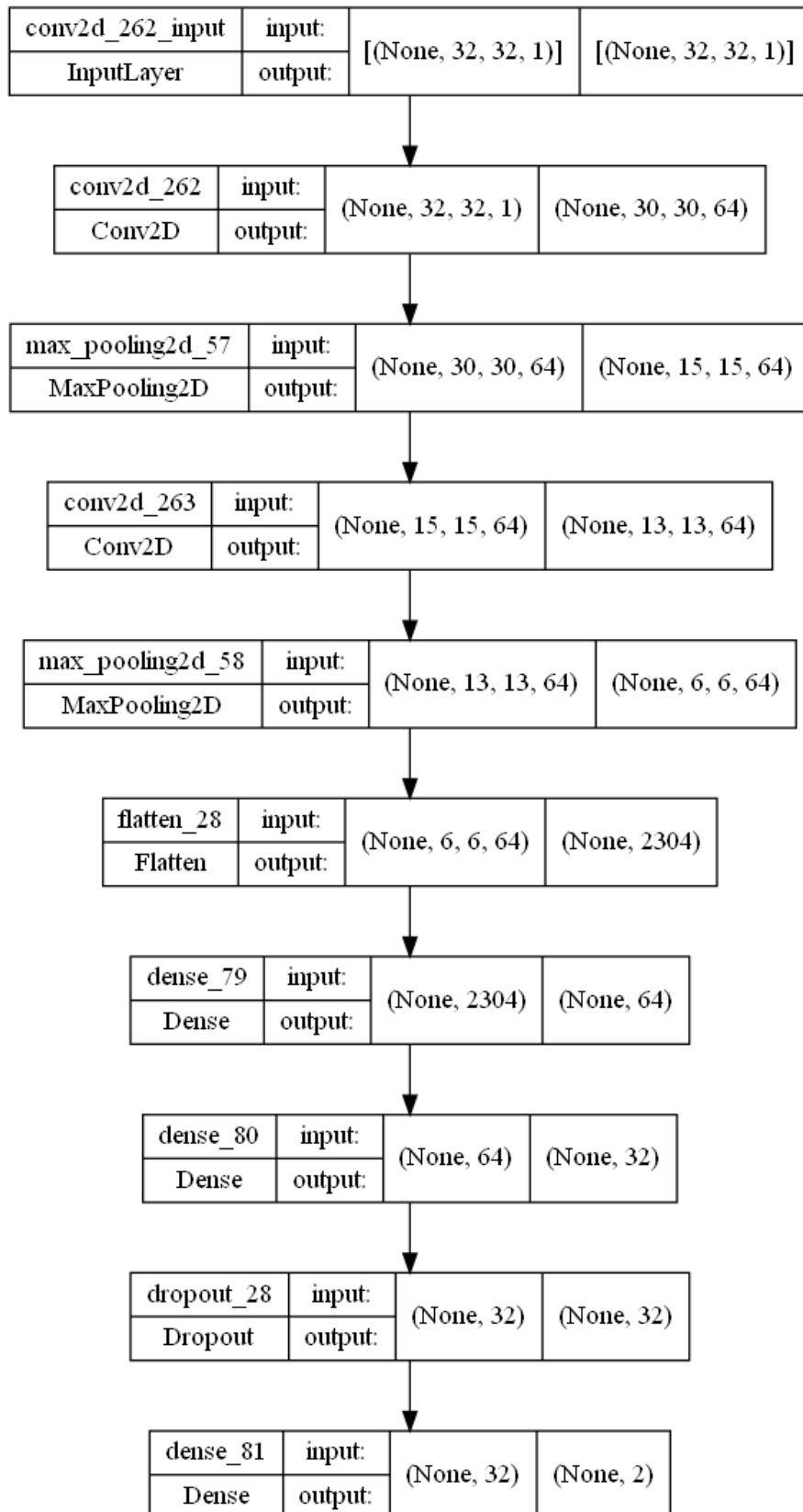
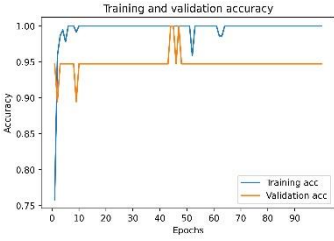
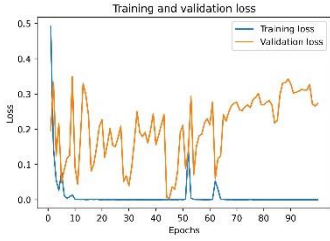
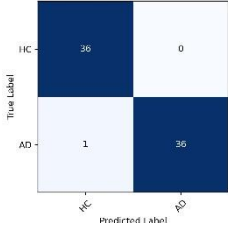
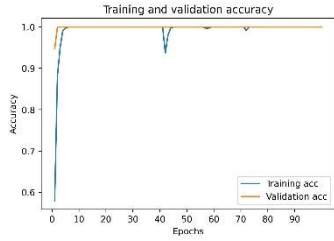
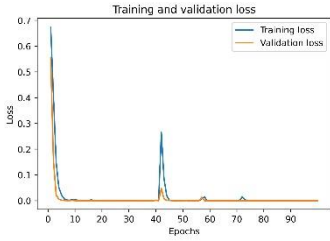
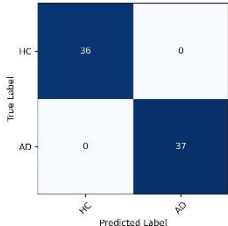
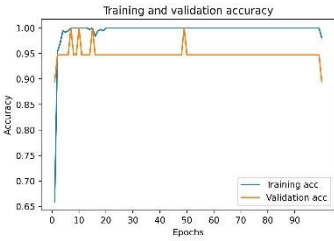
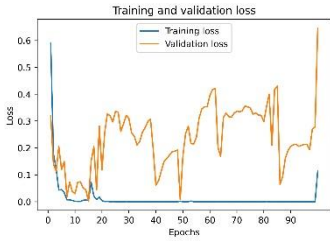
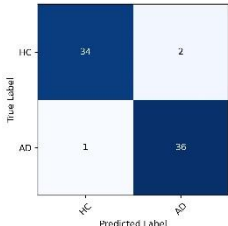
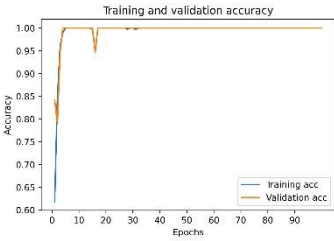
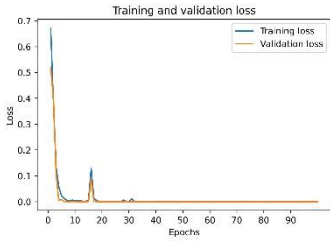
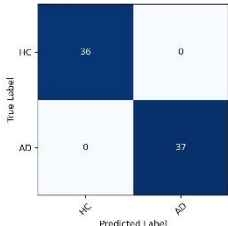
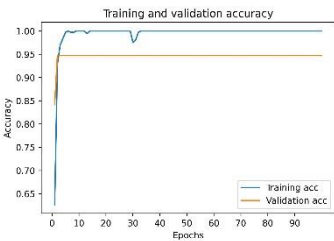
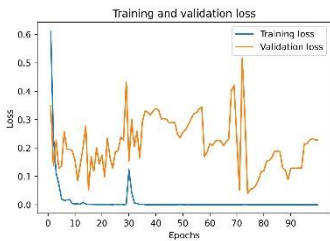
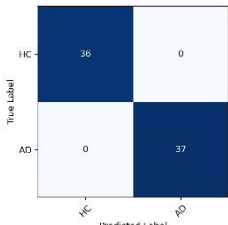
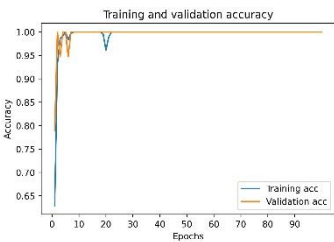
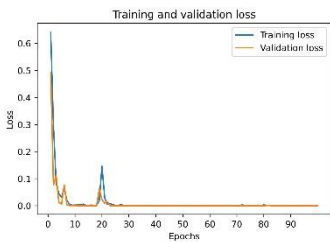
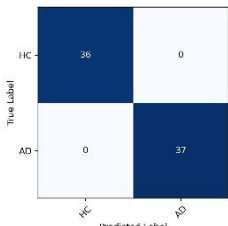


Figure 3. Architectural summary of proposed Conv2D model

Table 1. Train/validation accuracy, loss plots along 100 epochs and related confusion matrices for EEG sub-bands and full band range under different eyes states

		Train/validation accuracy	Train/validation loss	Confusion matrices
Delta Band (<4 Hz)	Eyes Closed			
	Eyes Open			
Theta Band (4-8 Hz)	Eyes Closed			
	Eyes Open			
Alpha Band (8-13 Hz)	Eyes Closed			
	Eyes Open			



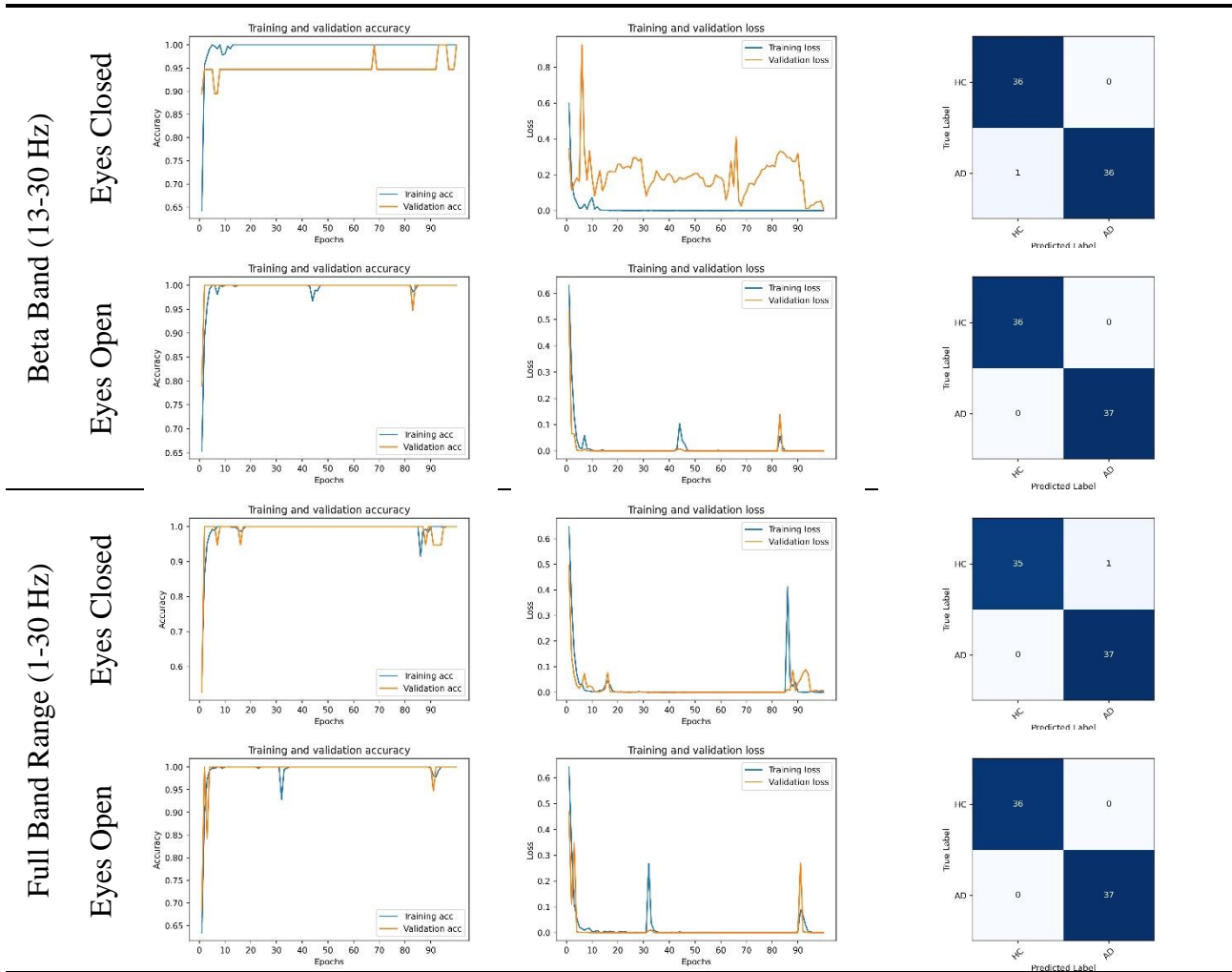


Table 2. Performance metrics for classification of AD vs. HC participants for EEG sub-bands and full band range under different eyes states

EEG Sub-bands	Eye Conditions	Participants	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Delta	EC	HC	0.99	0.97	1	0.99
		AD	0.99	1	0.97	0.99
	EO	HC	1	1	1	1
		AD	1	1	1	1
Theta	EC	HC	0.96	0.97	0.94	0.96
		AD	0.96	0.95	0.97	0.96
	EO	HC	1	1	1	1
		AD	1	1	1	1
Alpha	EC	HC	1	1	1	1
		AD	1	1	1	1
	EO	HC	1	1	1	1
		AD	1	1	1	1
Beta	EC	HC	0.99	0.97	1	0.99
		AD	0.99	1	0.97	0.99
	EO	HC	1	1	1	1
		AD	1	1	1	1
Full Band Range	EC	HC	0.99	1	0.97	0.99
		AD	0.99	0.97	1	0.99
	EO	HC	1	1	1	1
		AD	1	1	1	1

Table 3. Literature studies for AD detection based on deep learning architectures

Authors	Dataset	Extracted features	Machine Learning Architecture	Achieved Results (accuracy%)
Bi and Wang (2019) [8]	4 HC, 4 MCI, and 4 AD	2 D RGB spectral topographical maps	Spike Convolutional Deep Boltzmann machine	AD vs. MCI vs. HC: 95%
Kim and Kim (2018) [9]	10 HC, 10 MCI	Features from Relative Power	Deep Neural Network With 4 hidden layer	MCI vs. HC: 75%
Ieracitano et al. (2019) [10]	63 HC, 63 MCI, And 63 AD	2D grayscale Periodogram images	CNN with 1 Hidden layer	AD vs. HC: 91% AD vs. MCI: 84% MCI vs. HC: 92% AD vs. MCI vs. HC: 80%
Morabito et al. (2016)	23 HC, 23 MCI, And 23 AD	2D RGB images of Mexican Hat CWT	CNN with 2 hidden layer	AD vs. HC: 85% AD vs. MCI: 78% MCI vs. HC: 85% AD vs. MCI vs. HC: 82%
Zhao and He (2015) [11]	15 HC, 15 AD	Raw Data	Restricted Boltzmann Machine with 3 hidden layers	AD vs. HC: 92%
J Huggins et al. (2021) [12]	52 HC, 37 MCI, and 52 AD	2 D RGB of Scalogram images	AlexNet	AD vs. MCI vs. HC: 98.9%
Alvi et al. 2022 [13]	16 HC, 11 MCI	Raw EEG Data	LSTM, GRU, k-NN SVM	MCI vs. HC: 95.51%
<b>Current study</b>	24 HC (12 EO, 12 EC); 24 AD (12 EO, 1 EC)	Raw EEG Sub-bands	2D CNN	AD vs. HC: 100% for both EO and EC in alpha band

## Results and Discussion

In Fig. 2., amplitudes of 8s EEG samples and their PSDs with respect to time and frequency are given. These are the samples of randomly selected subjects from class of A (HC with EO), B (HC with EC), C (AD with EO), and D (AD with EC). Amplitudes of EEGs are set in range of [-50, 50]  $\mu\text{V}$  and Amplitudes of PSDs are between [0-150]  $\mu\text{V}^2$ . It is very difficult to differentiate ADs and HCs by only observing time series samples. It can be clearly seen that there is an increased alpha band effect during EC. This finding is compatible with previous findings [17]. Amplitude range of HC condition under EC and EO is wider in comparison with ADs. EEG patterns are so repetitive and changed in a narrowed in for AD patients. Amplitude of PSDs belong to EC is higher regarding EO. It is easily deduced that linearity is distinctively increased for AD patients. Amplitude of EEG has potential to classify ADs and HCs without any conversion stage and feature engineering. We only apply DWT to EEGs to investigate frequency specific observations.

Train/validation accuracies and train/validation losses are given with confusion matrices in Table 1 for all EEG sub-bands, and full band range under EC and EO conditions. Validation losses are so stable along 100 epoch for EO condition. Losses are suddenly increases and more

fluctuations are observed for EC. Validation accuracy is lower in comparison with training accuracy in most cases of EC. Discrimination rate of AD vs. HC increases under EO state in all cases. Most of the studies based on AD detection are included subjects with EC because EC states prevents possible eyes blinks and ocular noises. In addition to this advantageous case, alpha activity is increased during EC and authors in [17] stated that epoch with less alpha effect increases the discrimination of mild Alzheimer's. In current study, according to obtained performance metrics calculated from confusion matrices, all AD and HC time series are correctly classified for Alpha band and full band range under both eyes' state.

Table 3 summarizes binary and 3-way deep learning-based studies for detection of AD via. different perspective. All studies include equal size of participant class to balance sample size. Some of the studies have MCI, a conversion stage between HC and progression of dementia AD, for early detection purpose. Most of the studies proposed a 2D conversion method from 1D EEG time series to colored, or grayscale spectral maps for feature extraction. Very few studies processed with extracting direct features or using raw EEG itself. CNN, spike convolutional networks, pre-defined deep architectures (i.e. AlexNet) for 2D input arrays, and CNN is considered as most popular deep

learning-based approaches with different architectural structures. For binary approach using AD and HC participant, highest accuracy of 92% is obtained via applying Restricted Boltzmann Machine to raw EEG data [11]. We correctly discriminate all AD and HC instances with 100% accuracy by applying raw EEG inputs to 2 layered- CNN network. 8 s records are converted 32x32x1 squared input tensors to feed deep architecture. None of the literature studies in Table 3. reported any deduction and results to observe effects of different eyes states on AD detection. We put forward that EO state increases classification rate of AD vs. HC. Miraglia et al. (2016) suggest that eyes open state may reflect better the cortical impairment as well as information processing rather than eyes closed [18]. Authors in suggest eyes-closed EEG state with epochs including less alpha activity works better for diagnosis of AD [19].

There have been many methods for pre-processing step such as notch filtering, band pass filter, value normalization to [0-1], and artifact removal methods such as independent component analysis, visual inspection, blind source separation, baseline correction, and so on [20]. We believe that z-normalization is also a crucial pre-processing step before classification stage. z-normalization eliminates outliers coming from different classes and make an alignment in data distribution. Moreover, DWT maintains user an effective artifact handling using its low pass, and high pass filter pairs.

## Conclusion

In current study, DWT-CNN approach is applied for classification of AD and HC EEG records. 4<sup>th</sup> level DWT with 'db2' is applied to obtain EEG sub-bands. We have processed 8 s artifact free raw EEG segments via. 19 electrodes and constructed 12x19x32x32x1 input tensors for each of HC with EO, HC with EC, AD with EO and AD with EC states. Z-core normalization is applied to eliminate outliers coming from AD and HC classes and set data distribution with mean 0 and standard deviation 1. 2-layered CNN is used as machine learning architecture. According to performance metrics, all AD and HC time series are correctly classified for alpha band and full band range for both EO and EC state. Classification rate of AD vs. HC increases under EO state in all cases.

Drawbacks of current study are assumed as follows: including MCI patients may help to develop an early detection of dementia with handling MCI vs. AD, or MCI vs. all classification task. We will add MCI patients with equal size and similar demographics and repeat the experimental steps in future studies. Generalization ability of current approach may also increase within increasing number of participants. Combining 2D TF RGB images with raw EEG time series tensors in a multimodal learning approach is also potential work for further research. In a similar point of view, it is also promising study to combine EEG and MRI images as input sets for classifier. Moreover, a hyperparameter optimization task can be carried out via. alternative deep networks (transfer learning with pre-

trained networks, CNN-LSTM hybrid architectures, etc.) in upcoming studies.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared"

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared"

## Authors' Contributions

Seker M: Study conception and design, visualization, analysis, and interpretation of data, drafting of manuscript

Ozerdem MS: supervised the project, critical revision

## Acknowledgement

This study was supported by Dicle University Department of Scientific Research Projects (Project Number: MÜHENDİSLİK.20.005). A sincere appropriation to Julius Bamwenda for his diligent proofreading of the manuscript.

## References

- [1] S. Yang, J. M. S. Bornot, K. Wong-Lin, and G. Prasad, "M/EEG-Based Bio-Markers to Predict the MCI and Alzheimer's Disease: A Review from the ML Perspective," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 66, no. 10, pp. 2924–2935, 2019.
- [2] martin prince, "World Alzheimer Report," 2015.
- [3] R. Sivera, H. Delingette, M. Lorenzi, X. Pennec, and N. Ayache, "A model of brain morphological changes related to aging and Alzheimer's disease from cross-sectional assessments," *Neuroimage*, vol. 198, no. December 2018, pp. 255–270, 2019.
- [4] M. A. Parra, S. Butler, W. J. McGeown, L. A. B. Nicholls, and D. J. Robertson, "Globalising strategies to meet global challenges: The case of ageing and dementia," *J. Glob. Health*, vol. 9, no. 2, pp. 1–8, 2019.
- [5] L. F. Haas, "Hans Berger (1873-1941), Richard Caton (1842-1926), and electroencephalography.," *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 74, no. 1, p. 9, 2003.
- [6] K. D. Tzimourta *et al.*, "Analysis of electroencephalographic signals complexity regarding Alzheimer's Disease," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 76, pp. 198–212, 2019.
- [7] A. Farooq, S. Anwar, M. Awais, and M. Alnowami, "Artificial intelligence based smart diagnosis of Alzheimer's disease and mild cognitive impairment," *2017 Int. Smart Cities Conf. ISC2 2017*, pp. 0–3, 2017.

- [8] X. Bi and H. Wang, "Early Alzheimer's disease diagnosis based on EEG spectral images using deep learning," *Neural Networks*, vol. 114, pp. 119–135, 2019.
- [9] D. Kim and K. Kim, "Detection of Early Stage Alzheimer's Disease using EEG Relative Power with Deep Neural Network," in *2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2018, pp. 352–355.
- [10] C. Ieracitano, N. Mammone, A. Bramanti, A. Hussain, and F. C. Morabito, "A Convolutional Neural Network approach for classification of dementia stages based on 2D-spectral representation of EEG recordings," *Neurocomputing*, vol. 323, pp. 96–107, 2019.
- [11] Y. Zhao and L. He, "Deep Learning in the EEG Diagnosis of Alzheimer's Disease," in *ACCV Workshops*, 2014.
- [12] C. J. Huggins *et al.*, "Deep learning of resting-state electroencephalogram signals for three-class classification of Alzheimer's disease, mild cognitive impairment and healthy ageing," *J. Neural Eng.*, vol. 18, no. 4, 2021.
- [13] A. M. Alvi, S. Siuly, H. Wang, K. Wang, and F. Whittaker, "A deep learning based framework for diagnosis of mild cognitive impairment," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 248, p. 108815, 2022.
- [14] A. M. Pineda, F. M. Ramos, L. E. Betting, S. L. Andriana, and O. C. Id, "Quantile graphs for EEG-based diagnosis of Alzheimer's disease," *PLoS One*, vol. 15, no. 6, pp. 1–15, 2020.
- [15] L. Xie, C. Lu, Z. Liu, L. Yan, and T. Xu, "Studying critical frequency bands and channels for EEG-based automobile sound recognition with machine learning," *Appl. Acoust.*, vol. 185, p. 108389, 2022.
- [16] C. Ieracitano, N. Mammone, A. Bramanti, A. Hussain, and F. C. Morabito, "A Convolutional Neural Network approach for classification of dementia stages based on 2D-spectral representation of EEG recordings," *Neurocomputing*, vol. 323, pp. 96–107, 2019.
- [17] D. P. X. Kan, P. E. Croarkin, C. K. Phang, and P. F. Lee, "EEG Differences Between Eyes-Closed and Eyes-Open Conditions at the Resting Stage for Euthymic Participants," *Neurophysiology*, vol. 49, no. 6, pp. 432–440, 2017.
- [18] F. Miraglia, F. Vecchio, P. Bramanti, and P. M. Rossini, "EEG characteristics in 'eyes-open' versus 'eyes-closed' conditions: Small-world network architecture in healthy aging and age-related brain degeneration," *Clin. Neurophysiol.*, vol. 127, no. 2, pp. 1261–1268, 2016.
- [19] P. A. M. Kanda, E. F. Oliveira, and F. J. Fraga, "EEG epochs with less alpha rhythm improve discrimination of mild Alzheimer's," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 138, pp. 13–22, 2017.
- [20] M. de Bardeci, C. T. Ip, and S. Olbrich, "Deep learning applied to electroencephalogram data in mental disorders: A systematic review," *Biol. Psychol.*, vol. 162, p. 108117, 2021.



## Utilizing the Ensemble of Deep Learning Approaches to Identify Monkeypox Disease

Sedat ÖRENÇ<sup>1\*</sup>, Emrullah ACAR<sup>2</sup>, Mehmet Sıraç ÖZERDEM<sup>3</sup>

Batman University, Electrical-Electronics Engineering Department, sedat.orenc@batman.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1190-2849

Batman University, Electrical-Electronics Engineering Department, emrullah.acar@batman.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1897-9830

Dicle University, Electrical-Electronics Engineering Department, siracozerdem@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-9368-8902

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 4 November 2022

Received in revised form 29 December 2022

Accepted 30 December 2022

Available online 31 December 2022

#### Keywords:

Monkeypox, Deep learning,  
Classification

### ABSTRACT

Recently, the monkeypox disease spreads to many countries rapidly and it becomes a serious health problem. There are several symptoms that decrease the quality of the life. These symptoms must be overcome to detect monkeypox disease in earlier stages. Therefore, it is crucial to decrease the spread rate with the quick determination of the disease. In this study, it is aimed to identify monkeypox disease from images datasets obtained from Kaggle by using Convolutional Neural Network models. These models are named EfficientNetB3, ResNet50, and InceptionV3 respectively. According to the results of the three models, resNet50 is the best model when they compare aspects of performance. The accuracy of resNet50 is %94,00 therefore it has highest accuracy value. There are four parameters to evaluate the performance of the models. They are called as precision, recall, F1-score, and accuracy. These models demonstrate that monkeypox can be classified with high precision. Therefore these models can be used for the future of the work.

Doi: 10.24012/dumf.1199679

\* Corresponding author

## Introduction

After Covid-19, the new disease spreads rapidly all over the world. It is called monkeypox. Monkeypox is a disease that given rise to by the monkeypox virus [1]. Monkeypox can be transmitted both from animal to human and human to human [2]. There are numerous symptoms named as headache, fever, muscle aches, and back pain. It is crucial to remove these symptoms for increasing the quality of life [1]. In order to raise the life quality, it is important to detect monkeypox disease in earlier stages before spreading it. Therefore, in this paper, it is aimed by utilizing convolutional neural network techniques to identify monkeypox disease with high efficiency [3].

Monkeypox is an infectious disease caused by the Zoonotic Orthopoxvirus which belongs to the Poxviridae family. The virus was first specified in the body of a monkey in 1958 in a laboratory in Denmark while in humans it is first identified in 1970 in a 9-month-old boy living in the Democratic Republic of Congo. Between 1970 and 1986, the disease was reported in 10 people from the West African countries of Sierra Leone, Nigeria, Liberia, and

Ivory Coast, and in 394 people from the Congo Basin countries of Cameroon, the Central African Republic, and the Democratic Republic of Congo. The first monkeypox outbreak outside of Africa in 2003 affected more than 70 people in the United States. The number of cases reported worldwide is increasing every year, with over 6200 and 9400 confirmed and suspected cases reported by the World Health Organization (WHO) in 2020 and 2021, respectively. According to the WHO, from 1 January to 22 June 2022, 3413 laboratory-confirmed cases and one death have been reported [2], [4], [5], [6], [7],[8].

Today, with developing the algorithm and increasing data amount, it is brought a new idea. It is called deep learning. Deep learning method is a subset of machine learning. It has ability to solve complicated problems and it can overcome big datas. Additionally, DL has great advantages in many areas such as speech recognition, computer vision, image processing, etc. Image processing has become a remarkable research topic in the academic field [9]. Image processing has been in the field of Artificial Intelligence and deep learning algorithm has achieved remarkable results in the field of image processing. Traditional image processing models still have some problems. Based on big

data processing models, deep learning algorithms have benchmark results [10]. It is well known the importance of detecting monkeypox by utilizing deep-learning models. In this study, three deep-learning models are used. They are named as EfficientNetB3, resNet50 and InceptionV3 respectively. In order to evaluate the performance of the methods, four metrics are used. They are called as accuracy, precision, recall, and F1-score [11].

This paper is divided as follows: section 1 demonstrates the introduction of the study. Section 2 presents the literature survey for analysis of monkeypox disease. Section 3 presents the utilized models. Section 4 shows the results obtained by the classification models. Finally, section 5 concludes the study.

## Literature Review

It has been suggested by some researchers that several data collection and classification techniques can be used for monkeypox disease however there are fewer studies in the literature. These studies are demonstrated below.

Sitaula et al (2022) proposed to compare 13 different deep-learning models in order to identify monkeypox disease. Some models are called as VGG-16, Xception, MobileNet, and ResNet. In the work, fine-tune is used for increasing efficiency. They used well-established measures as they are called precision, recall, accuracy, and F1-score. With these parameters, they aimed to evaluate the performance of the models. The evaluation results demonstrate that the ensemble model provides the highest performance. One of the drawbacks of the study is the dataset size that was comparatively smaller as they explained [3].

Abdelhamid et al (2022) used two algorithms for developing the accuracy of monkeypox disease in the area of image classifications. The first algorithm is named the PSOBER algorithm, which is a hybrid of PSO and BER optimization algorithms and targets to choose the best features that can improve the classification accuracy. The second algorithm is called as SCBER; it aims to optimize the parameters of a neural network to get the best accuracy. A Publicly available dataset was used to assess the proposed algorithms. The assessment of the model was carried out by ten evaluation criteria. Moreover, these parameters were conducted to evaluate the efficiency and robustness of the proposed models [12].

Sahin et al (2022) proposed a new approach to detect automatically monkeypox disease thanks to the mobile system. The authors aimed to use Monkeypox Skin Lesion Dataset (MSLD) which they obtained from the Kaggle platform. For this purpose, MSLD database images were trained by using a deep transfer learning-based system. The authors used several deep learning models such as ResNet18, GoogleNet, EfficientNetb0, and MobileNetv2

and the results of the models were compared. Among the models, MobileNetv2 showed the best performance in terms of accuracy and it was integrated into the mobile applications. Accuracy, jaccard, precision, sensitivity, and F1-score was used to evaluate the performance of the systems [8].

## Material and Method

### Dataset

In this study, "Monkeypox Skin Lesion Dataset" dataset was used. Dataset composes of monkeypox images and the size of the images is 224x224 pixels. In the data set, there are three number parts. The number of training, the number of validation, number of test images are 2148, 45, and 406 respectively. The type of classification is binary. The images are divided into two parts as monkeypox and normal. For this division, it is aimed to acquire the best accuracy results.

### Deep Learning Models

Deep Learning is a subset of the machine learning. In this work, three deep learning algorithms were used. They were efficientNetB3, resNet50 and InceptionV3. These methods are very effective to classify monkeypox accurately and they have specific characteristic and layers. The main differences among these models are the numbers of layer and the structure of the models.

### EfficientNetB3

The efficientNetB3 model belongs to a family of models from B0 to B7. It is considered as one of the most highly efficient deep-learning algorithms trained over ImageNet [13]. This model has achieved much better efficiency and accuracy according to other models. Moreover, it has high potential to compute processes and it is faster [14].

In this paper, it is set the learning rate of 0,001 in The efficientNetB3 algorithm. It is also shaped all data images into (224,224,3) sizes. For optimization, it is used adam stochastic gradient algorithm and 'Relu and Sigmoid Activation' function was applied in this model. The epoch which is used in this work is 10 and batch size is specified as 32. In addition, there are two dropout layers that is used in the work and the number of dropout is 0,5.

### ResNet50

ResNet was proposed by Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, and Jian Sun in their 2015 research paper titled 'Deep Residual Learning for Image Recognition'. Many models are based on resNet50 because of its simplicity and practicality. It has been applied in numerous areas such as the detection of disease, identification, and segmentation [15].

It is difficult to solve complex problems with deep CNN networks however ResNet proposes a new opinion. It has

the ability to enlighten the complicated task and increase the model's accuracy. ResNet50 has 50 layers of residual networks. ResNet50 includes two structures. They are Identity block and Convolutional block. The curve lines represent the identity blocks and the rest one represent the convolutional block [16].

In this work, it is set the learning rate of 0,001 in resNet50 algorithms. Moreover, it is shaped all data images into (224,224,3) sizes. For optimization, it is used adam stochastic gradient algorithm and 'Relu Activation' function was applied in this algorithm. The epoch which is used in this study is 10 and batch size is specified as 32. In addition, there are two dropout layers that is used in the study and the number of dropout is 0,5.

### InceptionV3

Inception is one of the CNN models based on GoogleNet that it is managed in developing the performance of previous algorithms and a smaller error rate. This model is the third version of GoogleNet. The basic idea of the model is to reduce the number of connections. Despite of less connections, the efficiency of the model has high performance [17].

The InceptionV3 model is one of the modified types of the inception family which is generally used for object detection and image processing [18]. According to this model, every filter is added and the best filter is chosen for the particular image instead of selecting the filter size manually for every layer.

In our research study, we have set the learning rate of 0,001 in InceptionV3 algorithms. In addition, it is shaped all data images into (224,224,3) sizes. For optimization, it is used adam stochastic gradient algorithm and 'Relu Activation' function was applied in this work. The epoch which is used in this study is 10 and batch size is specified as 32. Moreover, there are two dropout layers that is used in the work and the number of dropout is 0,5.

### The Metrics for The Performance of Models

An evaluation metric is a value to assess the quality of the models like deep learning and machine learning methods. In the evaluation metric, there are four categories that relate the predicted results to the actual results, called as true positive, true negative, false positive, and false negative. There are several evaluation metrics that have been improved to assess the quality of the classification model. In this study, there are four evaluation metrics which are called accuracy, precision, recall, and F1-score to measure the performance of the methods [17].

Accuracy is a metric that calculates total cases that have been successfully identified with reference to the actual value. Equation (1) is the accuracy formula which is showed below.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{True positive} + \text{True negative}}{\text{All cases}} \quad (1)$$

Precision is a metric that calculates the number of cases in the positive that were estimated precisely. Equation (2) is the precision formula which is showed below.

$$\text{Precesion} = \frac{\text{True positive}}{\text{True positive} + \text{False positive}} \quad (2)$$

Recall is a metric that measures the number of actual identified positive cases from total positive cases. Equation (3) is the recall formula which is showed below.

$$\text{Recall} = \frac{\text{True positive}}{\text{True positive} + \text{False negative}} \quad (3)$$

F1-score is a metric that presents the average value of precision and recall. Equation (4) is the F1-score formula which is showed below.

$$\text{F1 - Score} = 2 \times \frac{\text{Precesion} \times \text{Recall}}{\text{Precesion} + \text{Recall}} \quad (4)$$

### Experimental Results

The experiments are conducted on the deep learning algorithms and results are seen in figures and tables. According to this study, three convolutional neural networks were used. They were efficientNetB3, resNet50 and InceptionV3. For the performance of the models, several parameters were used such as accuracy, precision, recall and F1-score. Moreover, ROC curve and confusion matrix were used to support better results of the models. Three models were compared according to their performance.

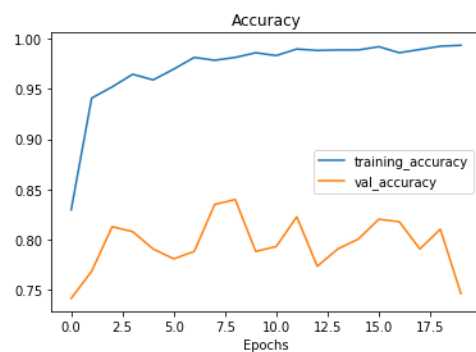


Figure 1. Accuracy of the efficientNetB3

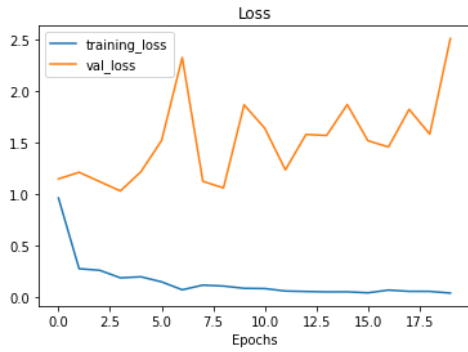


Figure 2. Loss of the efficientNetB3

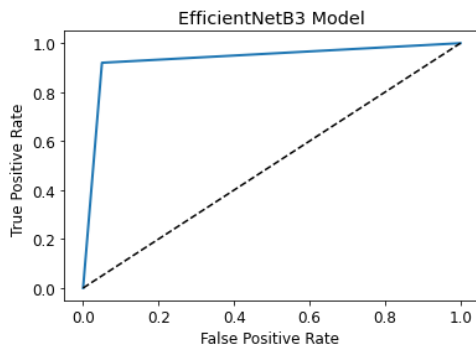


Figure 3. ROC curve of the efficientNetB3

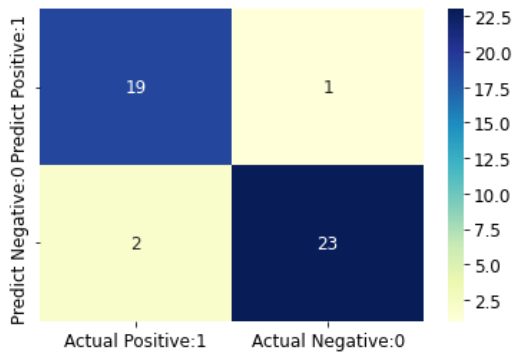


Figure 4. Confusion matrix of the efficientNetB3

The accuracy, loss, ROC curve and confusion matrix of the efficientNetB3 are shown above to observe the performance of the model. With regard to these parameters, this model has high efficiency. The ROC curve value of the efficientNetB3 model is 0.93 and it is considered a great score. The confusion matrix parts can be set as below.

- True Positives(TP) = 19
- True Negatives(TN) = 23
- False Positives(FP) = 1
- False Negatives(FN) = 2

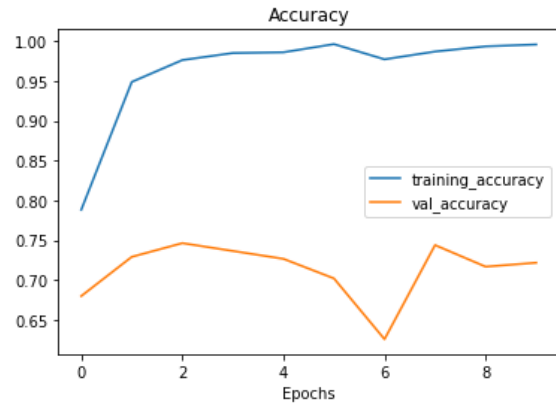


Figure 5. Accuracy of the resnet50

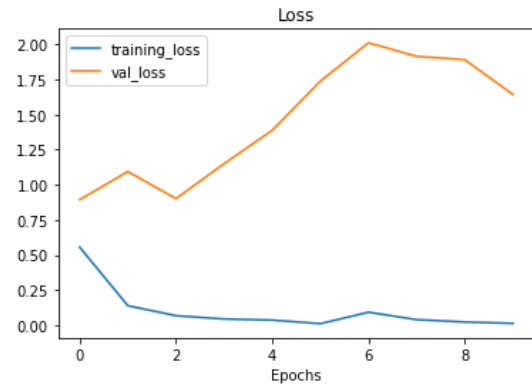


Figure 6. Loss of the resNet50

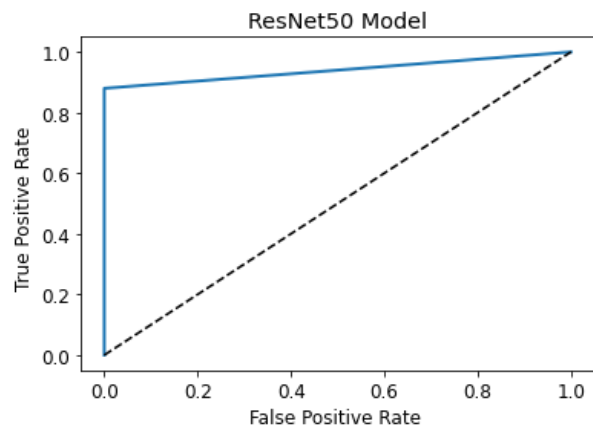


Figure 7. ROC curve of the resNet50



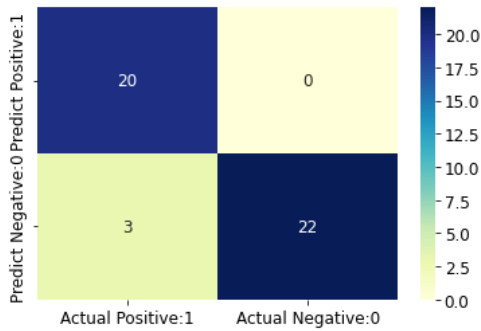


Figure 8. Confusion matrix of the resNet50

Figure 5,6,7,8 are parameter results of the resNet50 model. This model demonstrates that it has the best results according to values of the models. The ROC curve value of the resNet50 model is 0.94 and it is considered a high score. The confusion matrix parts can be set as below.

- True Positives(TP) = 20
- True Negatives(TN) = 22
- False Positives(FP) = 0
- False Negatives(FN) = 3

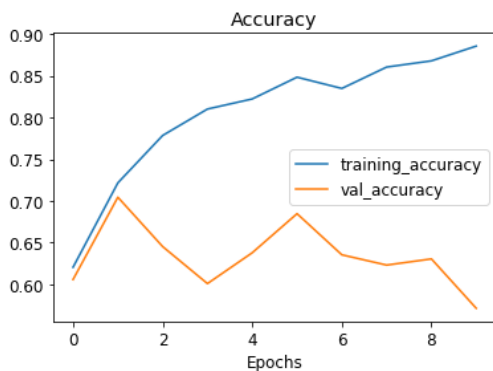


Figure 9. Accuracy of the inceptionV3

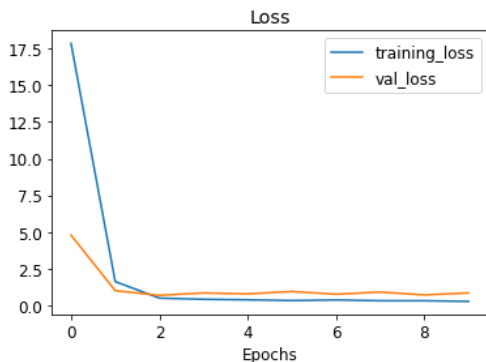


Figure 10. Loss of the inceptionV3

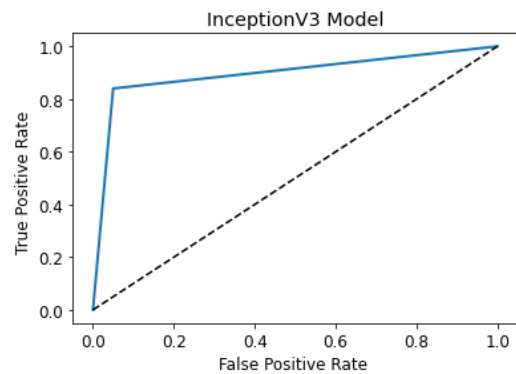


Figure 11. ROC curve of the InceptionV3

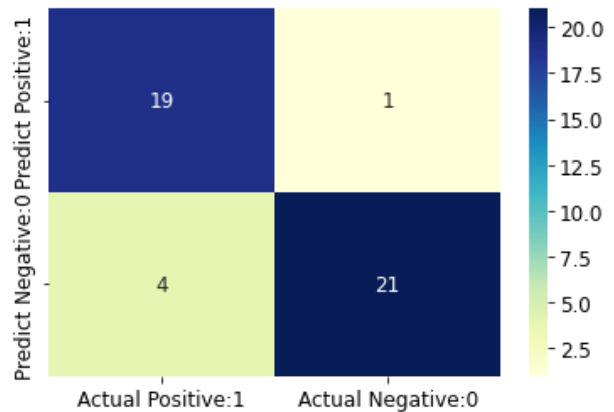


Figure 12. Confusion matrix of the inceptionV3

Figure 9,10,11,12 are results of the InceptionV3 algorithm. According to these results, This model is not considered a good score because the accuracy is set as 0.73 and it is lowest value among the models results. However, the ROC curve value of the InceptionV3 model is 0.89 and it is considered a satisfactory score. The confusion matrix parts can be set as below.

- True Positives(TP) = 19
- True Negatives(TN) = 21
- False Positives(FP) = 1
- False Negatives(FN) = 4

### Result and Discussion

In this work, it is aimed to identify monkeypox disease from image datasets obtained from Kaggle website by using Convolutional Neural Network models. It was used three different deep-learning algorithms to detect monkeypox disease. There are a number of characteristics and specific features associated with each model. All models were compared according to their performance and these performances were evaluated by some parameters

such as accuracy, precision, recall and F1-score. Among the models, resNet50 is the best method in terms of performance. Three tables are demonstrated below to compare the performances of the models.

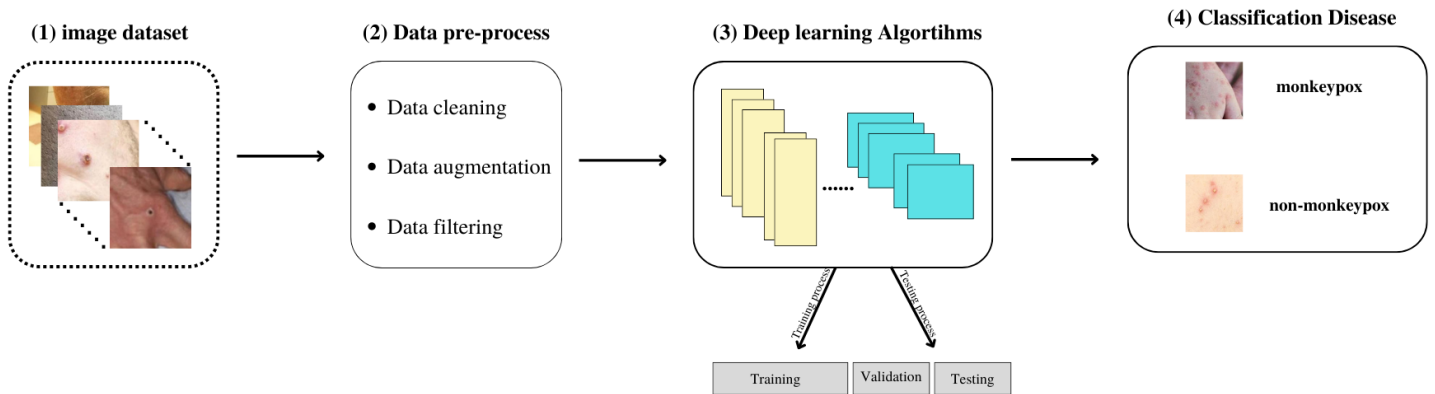


Figure 13. The work flow of the proposed models

The figure 13. demonstrates the processes of the proposed models. At the beginning, the images are acquired from Kaggle website. Datasets can be public or original. Before using training and test processes, images must be exposed to several steps such as data cleaning, data augmentation and data filtering. The basic target of all these steps are to have high-efficiency results. After these processes, models are designed and training/test steps are used. Finally, it is aimed to classify monkeypox disease [19].

Table 1. shows the evaluation metric of the methods. Using these metrics, we can figure out how well the models are performing. According to these parameters, it can be seen as easily that resNet50 has the best performance. InceptionV3 model has lower values with respect to performance because of the structure of the algorithm.

Table 2. demonstrates the speed of the models. Depending on the computer's performance, these values can be changed. Among the models, inceptionV3 seems the fastest model however resNet50 has the best parameter in terms of training and test accuracy.

Table 3. indicates the accuracy of the training and test processes. The results demonstrate that training and test processes carried out with high efficient performance. EfficientNetB3 and resNet50 are better than inceptionV3 with regard to parameters. Therefore, both models strongly provide training and test processes.

In general, it is seen that resNet50 and efficientNetB3 models are very close each other in regard to their performance however resNet50 is better than other models.

Table 1. The performance of the models

Models	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
EfficientNetB3	0,93	0,9	0,95	0,93
ResNet50	0,93	0,87	1	0,93
InceptionV3	0,73	0,67	0,8	0,8

Table 2. The time comparison of the models

Models	Training accuracy	Time used	loss
EfficientNetB3	0.9832	11s 153ms/step	0.0061
ResNet50	0.9953	24s 345ms/step	0.0158
InceptionV3	0.8855	7s 102ms/step	0.2708

Table 3. Training and test accuracy of the models

Experiments	Model	Traning accuracy	Test Accuracy
1	EfficientNet B3	0.9832	0.9933
2	ResNet50	0.9958	0.9933
3	InceptionV3	0.8855	0.7333

## References

- [1] K. D. AKIN, C. GURKAN, A. BUDAK, and H. KARATAŞ, "Açıklanabilir Yapay Zeka Destekli Evrişimsel Sinir Ağları Kullanılarak Maymun Çiçeği Deri Lezyonunun Sınıflandırılması," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 40, pp. 106–110, 2022, doi: 10.31590/ejosat.1171816.
- [2] H. BAYRAK, "Monkeypox virüsü; Dünya ve Türkiye Epidemiyolojisi," *J. Biotechnol. Strateg. Heal. Res.*, 2022, doi: 10.34084/bshr.1160542.
- [3] C. Sitaula and T. B. Shahi, "Monkeypox Virus Detection Using Pre-trained Deep Learning-based Approaches," *J. Med. Syst.*, vol. 46, no. 11, p. 78, 2022, doi: 10.1007/s10916-022-01868-2.
- [4] A. TUNA, "Monkeypox: Past to Present," *Kırıkkale Üniversitesi Tıp Fakültesi Derg.*, vol. 24, no. 2, pp. 409–416, 2022, doi: 10.24938/kutfd.1135547.
- [5] S. TEPETAŞ, Mine; SUNGUR, "Salgın haberleri maymun çiçeği virüsü salgını," vol. 7, no. 3, pp. 0–3, 2022.
- [6] A. K. AZKUR, E. AKSOY, and C. AKDIŞ, "Monkeypox and other zoonotic poxviruses," *Ankara Üniversitesi Vet. Fakültesi Derg.*, pp. 445–459, 2022, doi: 10.33988/auvfd.1146405.
- [7] M. M. Ahsan, M. R. Uddin, M. Farjana, A. N. Sakib, K. Al Momin, and S. A. Luna, "Image Data collection and implementation of deep learning-based model in detecting Monkeypox disease using modified VGG16," 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2206.01862>
- [8] V. H. Sahin, I. Oztel, and G. Yolcu Oztel, "Human Monkeypox Classification from Skin Lesion Images with Deep Pre-trained Network using Mobile Application," *J. Med. Syst.*, vol. 46, no. 11, p. 79, 2022, doi: 10.1007/s10916-022-01863-7.
- [9] P. Wang, "Research and Design of Smart Home Speech Recognition System Based on Deep Learning," *Proc. - 2020 Int. Conf. Comput. Vision, Image Deep Learn. CVIDL 2020*, no. Cvidl, pp. 218–221, 2020, doi: 10.1109/CVIDL51233.2020.00-98.
- [10] Y. Zhang and X. Zheng, "Development of Image Processing Based on Deep Learning Algorithm," *2022 IEEE Asia-Pacific Conf. Image Process. Electron. Comput. IPEC 2022*, pp. 1226–1228, 2022, doi: 10.1109/IPEC54454.2022.9777479.
- [11] S. Kamiş and D. Goularas, "Evaluation of Deep Learning Techniques in Sentiment Analysis from Twitter Data," *Proc. - 2019 Int. Conf. Deep Learn. Mach. Learn. Emerg. Appl. Deep. 2019*, pp. 12–17, 2019, doi: 10.1109/Deep-ML.2019.00011.
- [12] A. A. Abdelhamid *et al.*, "Classification of Monkeypox Images Based on Transfer Learning and the AI-Biruni Earth Radius Optimization Algorithm," *Mathematics*, vol. 10, no. 19, pp. 1–29, 2022, doi: 10.3390/math10193614.
- [13] S. R. Salian and S. D. Sawarkar, "M ELANOMA S KIN L ESION C LASSIFICATION U SING I MPROVED E FFICIENTNETB 3," vol. 08, no. 01, pp. 45–57, 2022.
- [14] M. Tan and Q. V. Le, "EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," *36th Int. Conf. Mach. Learn. ICML 2019*, vol. 2019-June, pp. 10691–10700, 2019.
- [15] X. Tian and C. Chen, "Modulation Pattern Recognition Based on Resnet50 Neural Network," *2019 2nd IEEE Int. Conf. Inf. Commun. Signal Process. ICICSP 2019*, pp. 34–38, 2019, doi: 10.1109/ICICSP48821.2019.8958555.
- [16] I. Z. Mukti and D. Biswas, "Transfer Learning Based Plant Diseases Detection Using ResNet50," *2019 4th Int. Conf. Electr. Inf. Commun. Technol. EICT 2019*, no. December, pp. 20–22, 2019, doi: 10.1109/EICT48899.2019.9068805.
- [17] M. Raihan and M. Suryanegara, "Classification of COVID-19 Patients Using Deep Learning Architecture of InceptionV3 and ResNet50," *Proc. - 2021 4th Int. Conf. Comput. Informatics Eng. IT-Based Digit. Ind. Innov. Welf. Soc. IC2IE 2021*, pp. 46–50, 2021, doi: 10.1109/IC2IE53219.2021.9649255.
- [18] N. S. Shadin, S. Sanjana, and N. J. Lisa, "COVID-19 Diagnosis from Chest X-ray Images Using Convolutional Neural Network(CNN) and InceptionV3," *2021 Int. Conf. Inf. Technol. ICIT 2021 - Proc.*, vol. 3, no. September 2012, pp. 799–804, 2021, doi: 10.1109/ICIT52682.2021.9491752.
- [19] E. ACAR, Ö. TÜRK, Ö. F. ERTUGRUL, and E. ALDEMİR, "Employing deep learning architectures for image-based automatic cataract diagnosis," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 615–623, 2021, doi: 10.3906/elk-2103-77.



## Effect of Fibre Orientation and Loading Direction on The Compressive Response of E-Glass/Epoxy Laminated Composites Used in Modern Helicopter Blades

Abdullah Çelik<sup>1</sup>, Yusuf Arman<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Tinaztepe Campus, celikabdullahcelik@hotmail.com, Buca, İzmir, Turkey, Helicopter Mechanic Repair Center, Turkish Airforce 2nd Main Jet Base, Orcid No: 0000-0003-2842-8650

<sup>2</sup> Dokuz Eylül University, Mechanical Engineering Faculty, Tinaztepe Campus, Buca, İzmir, Turkey, yusuf.arman@deu.edu.tr; Orcid No: 0000-0001-5538-8434

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 4 July 2022

Received in revised form 29 September 2022

Accepted 31 October 2022

Available online 31 December 2022

#### Keywords:

Hopkinson bars, dynamic compression test, helicopter blade, composite materials, numerical analysis, impact behavior

### ABSTRACT

In this investigation, the dynamic compression tests of glass fibre reinforced polymer was studied experimentally and numerically under varying the fibres orientation and the loading conditions to obtain the dynamic behavior. The composites consist of uni-directional E-glass fibres reinforced epoxy polymer composites used as an inner surface in modern helicopter blade application. Specimens with a cylindrical shape are impacted at a constant strain rate under in-plane and out-of-plane, subjected to the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) and LS-DYNA® programs. The numerical results are in good agreement with experimental results. The results show that the out-of-plane stress values for different fibre orientation are close to each other, but the in-plane stress value is far lower for the fibres direction of 45<sup>00</sup>. This study can give ideas about fibre orientation selection for dynamic effects during the helicopter blade production phase. Not only simple tests but also practical ideas make this study stand out. Considering results, 90<sup>0</sup> fibre direction in helicopter blades seems more advantageous against dynamic effects.

Doi: 10.24012/dumf.1140112

\* Corresponding author

## Introduction

Several rotor blades combination creates a helicopter rotor system and a control system that generates the aerodynamic lift and thrust forces in forwarding flight. Since helicopters are capable of vertical landing and takeoff, they are exposed to foreign matter damage in different terrain conditions. As the blades rotate very fast and due to the turbulence it creates, the most exposed part to the foreign material damage is the surface of the blades. Historically, the blade surface was made with clothes initial, and then metallic materials were used in production. Helicopter rotor blade surface was moved into the third revolutionary change to the all-composite structure. There has been growing application in composite materials for lighter and more efficient helicopter blades instead of metallic materials. The main characteristics of composite structures superior to metal structures are low crack propagation rate and the nature of failures for rotor blades [1]. Examples of this trend are placed in recent aircraft as Airbus company helicopter models, in which the extensive use of composite parts. For instance, AS 532 Cougar helicopter rotor blades have hybrid composite parts whose outer surface is carbon fibre and the inner surface is glass

fibre epoxy plates [2]. The utilization of laminated composite materials in many mechanical and aerospace engineering structures has increased due to, among other factors, their specific stiffness and strength [3]. Although composite materials have many advantages, they have a low resistance of high-speed impact compared to metallic structures. Thus, it is mandatory to accurately describe damage under dynamic loading and the effect of strain rate on the response of these materials for safety design. The Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) have widely used to describe the dynamic properties of materials at different strain rates [4-7]. The effect of different strain rates on dynamic behavior in composite laminates were studied using the Split Hopkinson Bar [8-11]. Hosur et al. [12] investigated the dynamic behavior of uni-directional carbon/epoxy composite laminates under SHPB compression tests related to various strain rates. The dynamic results were compared with static compression tests, and they found that the stiffness and hardness values obtained from dynamic tests are higher than the values obtained in static tests. The dynamic compressive action of uni-directional glass/epoxy composite at different off-axis angles in the transverse and longitudinal methods direction

was studied by Kumar et al. [13]. Dynamic behavior of glass fibre reinforced polymers obtained for in-plane and out-of-plane compression tests were studied using SHPB varying the fibres direction and the loading types by Tarfaoui et al. [14,15]. For in-plane tests, they revealed that the dynamic strength of the material is dependent on fibre orientation and impact pressure. The material is also highly sensitive to fibre orientation at the same impact pressure for out-of-plane tests. The dynamic compressive behavior of  $[0/90^0]_{26}$  glass/epoxy laminates in-plane and out-of-plane directions was studied using (SHPB) by Arbaoui et al. [16,17]. They emphasized that the in-plane loading condition is weaker than the out-of-plane loading condition and the strain rate is the factor determining the dynamic properties. As can be seen from the available literature, there are studies in which glass fibre composites [18-22] but, there are few studies focused on production and practice related to the high-speed impact of modern helicopter blades using SHPB) device and LS-DYNA® program. This paper concerns the in-plane and out-of-plane dynamic impact of glass fibre laminated composites. Compression tests were performed at 10 psi impact pressure to catch desired speed (10 m/s) following the machine pressure-velocity chart. In-plane-loading, parallel to the layers plane and out-of-plane loading, according to the thickness, was selected due to the high-speed rotation behavior of the blades. All of the tests were carried out according to the fibres direction of  $90^0$  and  $45^0$ . Dynamic stress and time results were presented as graphics for good comparisons. These results will play a helpful role in developing carbon/glass hybrid composite models for efficient design optimization related to helicopter blades.

## Experimental Procedure

### Material and Specimens

Helicopter blades are sandwich structures with carbon fibre plate outside, glass fibre plate underneath and Nomex honeycomb core. Figure 1 represents this structure.



Figure 1. A real cross section from the helicopter blade.(outer surface; Carbon laminate, inner surface; glass laminate, core; Nomex honey comb)

The first part exposed to the impact is the outer carbon and glass fibre layers. Since the impact behavior of the

glass fibre layer was discussed in this study, test samples were obtained by preparing glass fibre layers. Panels of  $500\text{mm} \times 500\text{mm}$  were made by infusion process (see Figure2), with 36 unidirectional layers, stacking sequence of  $[0/45]_{36}$  and  $[0/90]_{36}$ .

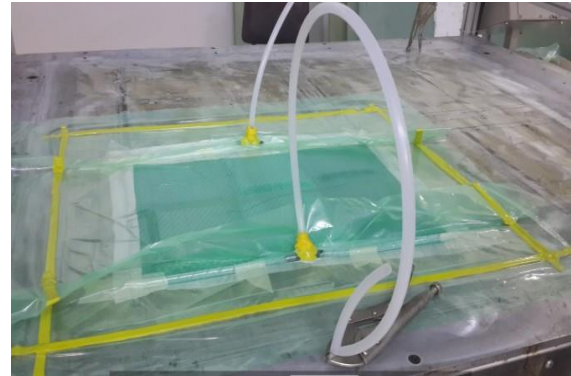


Figure 2. Production of composite layers

The thickness of the samples was applied for 10.0 mm. The areal density is  $600\text{ g/m}^2$  for two type of samples. A bicomponent Araldite LY 564 epoxy resin with an Aradur 3487 BD hardener was used as a thermoset polymeric matrix. The mixing ratio of the epoxy to the hardener was 3:1 by weight. The resin was infused under the vacuum as 1 bar after packaging materials. Curing was applied on a heating table at  $50^0\text{C}$  for 30 min preheating and cured at  $100^0\text{C}$  for 2 hours. After, samples were left for cooling at room temperature. Each layer creates orthotropic mechanical properties in the three orthogonal directions. For dynamic experiments, the cylindrical specimens were cut with a diameter of 6.0 mm for out-of-plane and in-plane loading testing (see Figure3).

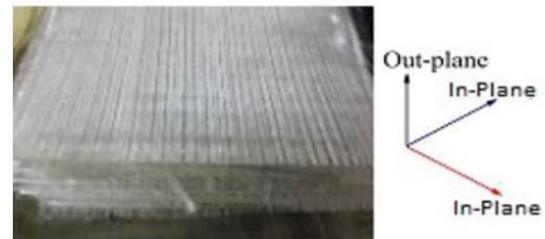


Figure 3. fibre layers and plane construction representation

The aspect ratio of the cylinder specimens was selected to satisfy dynamic equilibrium requirements in SHPB testing under plane loadings. The cylindrical samples were cut slowly using vertical CNC machine without using water (see Figure 4). The accuracy of the measurements was checked at each stage.

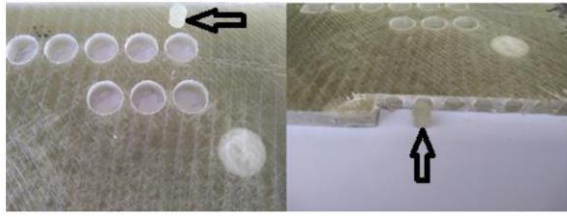


Figure 4. Cutting samples in the out-of-plane (a) and in-plane direction (b)

**Experimental Details For Tensile Tests**

The glass fibre reinforced polymer layers were produced using the vacuum infusion method. Uni-directional E-glass fibres and Aradut epoxy resin were used to produce the four-laminates. The composite laminates were about 1,5 mm in thickness. They were cut into samples having sizes of tensile test standards by using a water jet cutting machine (see Figure 5). LS-DYNA® parameters were determined with tensile testing of the glass fibre reinforced polymer specimens according to ASTM D3039 and ASTM D638 standards.

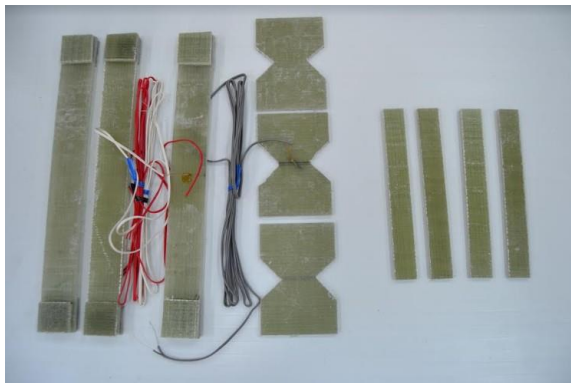
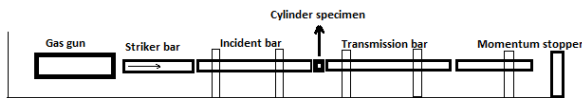


Figure 5. Sizes of tensile test specimens

**Dynamic Compressions**

The prepared samples were subjected to uniaxial high strain rates in compression using the SHPB technique. Developed according to the recommendations of Gallina and coworkers [23], the SHPB apparatus (see Figure 6) is suitable for tests at strain rates in the range of  $10^2$  to  $10^4$  s<sup>-1</sup>.



**Figure 6.** Split Hopkinson pressure bar system setup

To provide the hypothesis of one-dimensional wave propagation, the length of the striker bar used in the SHPB apparatus is 300.0 mm and transmission bars are 2.0 m with a length/diameter ratio of 100 for both the incoming and transmitting rods [24].

High strength steel was chosen for the bar material to match the impedance resistance with the composite samples [25]. To validate the results obtained from the experiment, at least three SHPB samples were tested for each parameter listed in Table 1.

Sample Number	fibre Orientation, out-of-plane/in-plane impact and test number (respectively)
A10	90° fibre orientation, out-of-plane loading, LS-DYNA®
A1	90° fibre orientation, out-of-plane loading experiment
A20	90° fibre orientation, in-plane loading, Ls Dyna
A2	90° fibre orientation, in-plane loading experiment
B10	45° fibre orientation, out-of-plane loading, Ls Dyna
B1	45° fibre orientation, out-of-plane loading experiment
B20	45° fibre orientation, in-plane loading,LS-DYNA®
B2	45° fibre orientation, in-plane loading experiment

TABLE 1. Sample numbers, fibre Orientation, out-of-plane/in-plane impact and test number. (Note: Since the B10 LS-DYNA® results are the same as the A10 LS-DYNA® results, only A10 is presented in the comparison charts.)

Petroleum jelly was rubbed into the sample and bar interior surfaces to reduce interfacial friction. 19.0 mm diameter maraging steel bars were used for all tests. Considering the velocity effects on the sample and data scattering, the sample strength was 6 GPa and the yield strength in the bar was 2.4 GPa at most, which was adapted to the experimental design.

The maximum sample diameters  $d_s$  and bar diameters  $d_b$  can be estimated. 2.4 GPa bar strength is an ultra high strength steel feature. Accordingly, equation 1 gives the sample diameter approximately 6 mm. After determining the sample diameter, the second priority dimension is the sample thickness. The aspect-to diameter ratio is 1.0 for the brittle materials used in the SHPB experiments, and slight failure strain in the specimen limit the achievable strain rate [26]. Both end faces of the sample should be flat and parallel. Figure 7 shows an example of a composite cylindrical specimen.

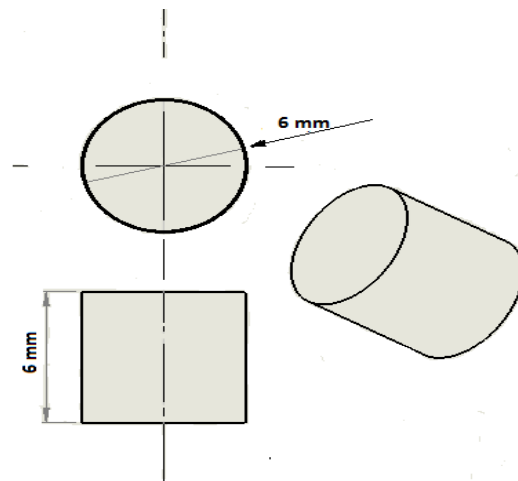


Figure 7. Geometry of a hard specimen prepared for SHPB

While inspecting the damaged helicopter blades, the impact relates to the out-of-plane and the in-plane. Because, according to the working principle, foreign materials moved by turbulence or blade rotating at a speed of about 265 RPM during contact with the branches of a tree or stone hit the composite structure just behind the leading edge. Due to the shape of the raindrop, a parallel collision occurs on the layers immediately after contact with the surface (see Figure 8).

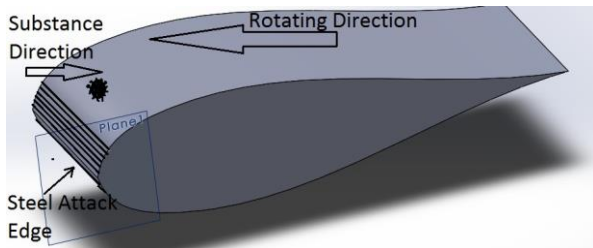


Figure 8. Illustration of impact processing to blade

In Fig 9, the Turkish Air Force Blade Repair Center photos illustrate real foreign material damage on the blade surface during flight.



Figure 9. Damaged main rotor blade: Turkish Airforce Blade Repair Center

It shows that in-plane impacts are an issue to be emphasized for both carbon and glass fibre plates in addition to out-of plane impacts. The basis of the study was inspired by real damages on blades.

$$d_s = \sqrt{\frac{0.3 \times 2.4}{6}} d_B = 0.346 \times 19 = 6.57 \text{ mm}$$

### Numerical Model

#### Mat\_Composite\_Failure\_Solid\_Model

The simplified failure model of glassfibre reinforced polymersamples was conducted to obtain an impact curve under the impact loading. material mode *MAT59* (MAT\_COMPOSITE\_FAILURE\_SOLID\_MODEL) was

selected for model the SHPB testing. In *MAT59*, material parameters (Table 2) are obtained from static tests using the same composite plate samples.

$E_a$	$E_b$	$E_c$	$G_{ab}$	$G_{bc}$	$G_{ba}$	$V_{ba}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
25.3 GPa	25.3 GPa	1.51 GPa	4.7 GPa	3.8 GPa	3.8 GPa	0.2	0.12	0.12
$XX_T$	$YY_C$	$S_{BA}$	$XX_C$	$YY_T$	$S_{CB}$	$S_{CA}$	$ZZ_T$	$ZZ_C$
610 MPa	412 MPa	100 MPa	412 MPa	610 MPa	93 MPa	93 MPa	366 MPa	247 MPa

TABLE 2. Material parameters for glass fibre reinforced polymer laminates

### Impact Damage Simulation

The material type and size used in the computational model were the same as reported in the experimental studies without bar length. Simulations were modelled for glass fibre reinforced polymer cubic test samples by SHPB bars. SHPB bars have been reduce by 1:20 to get results in a shorter time. In addition, the density of the bars has been increased at the same rate. The results of these analysis were substantially similar to the SHPB test results. The impact simulation curves of out-of-plane specimens are more convergent than the curves of in plane test results.

### Results And Discussion

An engineering stress-time curve was obtained so that the strain rate did not change. The specimen was broken into pieces at a strain rate of about  $1000 \text{ s}^{-1}$  and a velocity of the striker bar of about  $10.0 \text{ m/s}$ . Each type of specimen with the same test condition has been tested more than three times to verify the reliability of the results. The stress-time curves at constant strain rates have been obtained for different fibre orientations, as shown in Fig 10-13 (out-off-plane, in-plane direction).

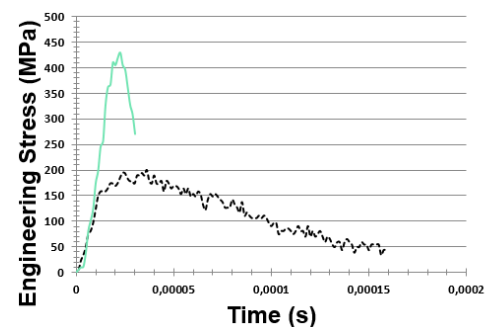


Figure 10. The stress-time curves of the specimen under in-plane loading

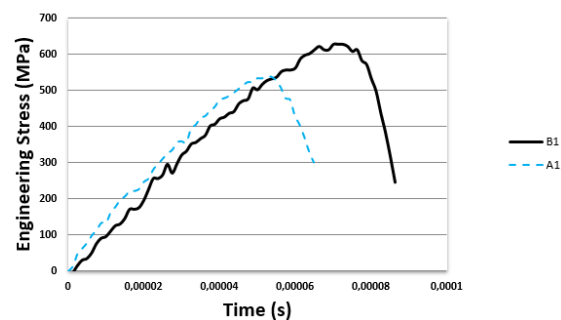


Figure 11. The stress-time curves of the specimen under out-of-plane loading

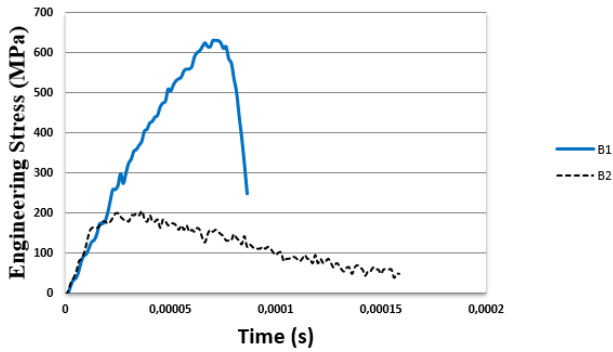


Figure 12. The stress-time curves of the specimen under out-of-plane loading and in-plane loading.

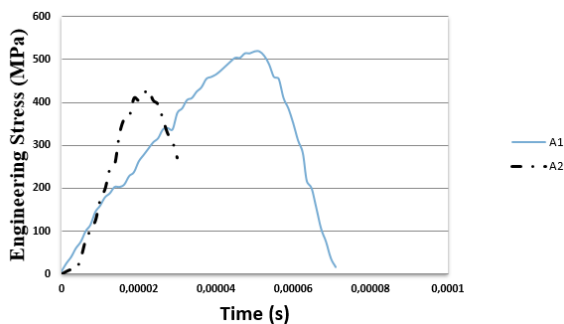


Figure 13. The stress-time curves of the specimen under out-of-plane loading and in-plane loading

All results of glass fibre samples agree well; it could be considered correct and used to be studied. The appropriateness of the results is seen and interpreted from the comparative charts presented (see Figure 14).

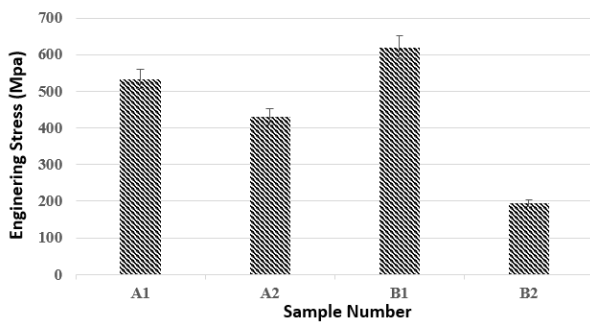


Figure 14. A comparison of all test results with the standard deviation.

A2 reached approximately the twice stress value compared to B2. Considering that the materials hit the propeller surface horizontally in general, the 90° fibre array is considered an advantage.

For in-plane tests, impact pressure and fibre orientation largely determine the dynamic strength of the material. A1 and B1 reached a similar stress value compared to in-plane loading. It was observed that the fibre arrangement does not significantly affect the impacts applied to the surface in a

vertical direction. When evaluating the effect of vertical impacts on the blades, it is concluded that fibre orientation may not be compared. B1 reached more than twice the stress value compared to B2 (see Figure 12). A1 reached a more significant stress value than A2 (see Figure 13). The difference between A1 and A2 is far smaller than between B1 and B2. The slope of the curves steepens with in-plane loading for A. In addition, the peak stress of composites was obtained for B with out-of-plane loading. As in this study, Tarfaoui et al. [5] presented that the dynamic strength of materials mostly depends on fibre orientation for in-plane tests. It can be seen that A2 and B2 comparison in Figure 10. Arbaoui et al. [16,17] emphasized that the dynamic properties of [0/90°]<sub>36</sub> glass/epoxy laminates are strain-rate sensitive, and the out-of-plane loading condition is when the material is more resistant than the in-plane loading condition.

Experimental Results Comparison. We obtained that [0/45°]<sub>36</sub> glass/epoxy laminates are more resistant in the case of out-of-plane loading as compared to the in-plane loading case than results of [0/90°]<sub>36</sub> glass/epoxy laminates comparison case. A1 and B1 comparisons can be seen easily in figure 11. Composites contain weaker epoxy resin than fibres between fibre layers. The fibre material has minimal time to respond when loading by the in-plane dynamic method. However, all specimen types have already split into pieces with 10 m/s striker velocity, as shown in figure 15.



Figure 15. Disruption of the specimen under in-lane loading

Experimental and Numerical Results Comparison. The compression after impact simulations is applied with the LS-DYNA® program.

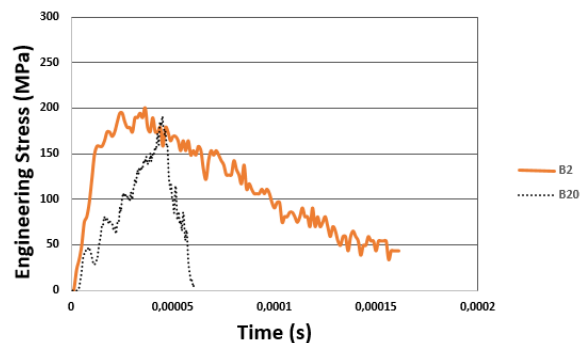


Figure 16. Comparison of stress and time with varying fibre orientation under in-plane loading conditions (Fibre



Orientation:45<sup>0</sup>)

Comparisons of the stress and time values obtained from the tests and numerical simulations performed for all samples are presented on graphics (see Figure 17-18).

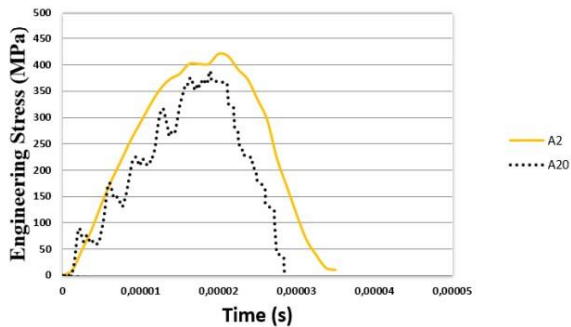


Figure 17. Comparison of stress and time with varying fibre orientation under in-plane loading conditions (Fibre Orientation:90<sup>0</sup>)

Stress was obtained as 190.0 MPa for 45<sup>0</sup> fibre Orientation specimen and 185.0 MPa for the numerical model in LS-DYNA® under in-plane loading conditions as shown in Figure 17. The results show the difference rate between experimental and numerical results as 3%. Stress were obtained as 430.0 MPa for 90<sup>0</sup> fibre Orientation specimen and 375.0 MPa for the numerical model in LS-DYNA® under out of-plane loading conditions as shown in Figure 16. The results show the difference rate between experimental and numerical results as 12%. Stress was obtained as 520.0 MPa for the 90<sup>0</sup> fibre orientation specimen and 470.0 MPa for the numerical model in LS-DYNA®

under out-of-plane loading conditions, as shown in Figure 18.

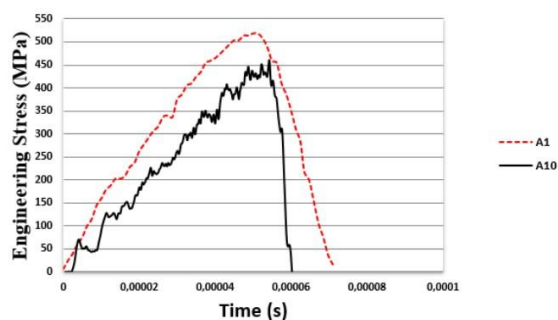


Figure 18. Comparison of stress and time with varying fibre orientation under out of-plane loading conditions (Fibre Orientation:90<sup>0</sup>)

The results show the difference rate between experimental and numerical results as 9%. Also, graphic line slopes are very close to each other for out-of-plane loading conditions than in-plane loading.

## Conclusions

The glass/epoxy laminate composites in our research are reliable materials for the inclusive casings of the helicopter rotor blades. For this reason, considering the working principle of the blades, the focus is on out-of-plane and in-plane impact using SHPB. The epoxy mainly bears the loading when dynamic compression is applied in the in-plane direction. For tensile strength character, in-plane strength is much higher than out-of-plane strength contrast the compression strength character [27]. Tarfaoui et al. [28] highlighted that the glass/epoxy composites offer high strength properties in out-of-plane pressure dynamic load tests as we obtained. Details photos and research from the helicopter blade repair centre show that the damages occur in-plane direction due to the blades' structure and range of motion. Designers can increase the dynamic resistance strength of helicopter rotor blades with 90<sup>0</sup> degrees fibre orientation selection. Depending on the loading direction and fibre orientation, the material behaves as follows:

1. The composites are strain-rate sensitive materials. The strength limit and the slope of the stress–time curves steepen for 45<sup>0</sup> fibre orientation under in-plane dynamic compression.
2. Regardless of the application direction of the force and fibre orientation, all samples were split into pieces with 10 m/s striker velocity.
3. ±90<sup>0</sup> and ±45<sup>0</sup> fibre orientation stress value decreasing rate was obtained as 17% and 69%, respectively, while the stress value decreases by changing loading direction from out-of-plane to in-plane.
4. Out-of-plane and in-plane stress value decreasing rate was obtained as 16% and 55% respectively in the stress value decreases while the changing of fibre orientation from ±90<sup>0</sup> to ±45<sup>0</sup>.
5. Considering that the materials which hit the propellers generally come horizontal to the surface because of the blade shape and flight principle, the ±90<sup>0</sup> fibre array is considered to be an advantage.
6. It was observed that the fibre arrangement does not have a significant effect on the impacts applied to the surface for out-of-plane direction.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared

## Authors' Contributions

Çelik A: Study conception, testing, simulation, analysis, and interpretation of data, drafting of manuscript

Arman Y: Conceived the original idea, supervised the project, critical revision

## Acknowledgement

We special thank to Dokuz Eylül University BAP unit for their contributions. Project:2019.KB.MLT.003 ID. 2120

## References

- [1] L.L.Douglas and W.K. Stratton. Technical breakthrough for helicopter rotor blades, SAE Transactions, Composite Structure Vol. 84, Section 4: 750934–751187 (1975), pp. 3114-3130.
- [2] W.B. Harlamert, R. Edinger, Development of an aircraft composite propeller, SAE Transactions, Vol. 88, Section 3: 790527–790858 (1979), pp. 2028-2033.
- [3] R.M. Marat-Mendes, M.M. Freitas, Failure criteria for mixed mode delamination in glass fibre epoxy composites, Composite Structure 92 (2010) 2292–2298.
- [4] Z. Song, Z. Wang, H. Ma, H. Xuan, Mechanical behavior and failure mode of woven carbon/epoxy laminate composites under dynamic compressive loading, Composite Part B 60 (2014) 531-536.
- [5] M. Tarfaoui, S. Choukri, A. Neme, Dynamic response of symmetric and asymmetric E-glass/epoxy laminates at high strain rates. Key Engineering Materials 2010;446:73–82.
- [6] A. Jadhav, E. Woldesenbet, S. Pang, High strain rate properties of balanced angle-ply graphite/epoxy composites. Composite Part B 34 (2003) 339-346.
- [7] J. Arbaoui, M. Tarfaoui, C. Bouery, A. EL Malki Alaoui, Comparison study of mechanical properties and damage kinetics of 2D and 3D woven composites under high-strain rate dynamic compressive loading. Int J Damage Mech 2016:1–22.
- [8] S. Sassi, M. Tarfaoui, H.B. Yahia. An investigation of in-plane dynamic behavior of adhesively-bonded composite joints under dynamic compression at high strain rate, Composite Structures, Volume 191, 1 May 2018, Pages 168-179.
- [9] A.M.A El-Habak. Mechanical behavior of woven glass fibre-reinforced composites under impact compression load. Composites 1991;22(2):129–34.
- [10] J. Harding, Effect of strain rate and specimen geometry on the compressive strength of woven glass-reinforced epoxy laminates. Composites 1993;24(4):323–32.
- [11] R. L. Sierakowski, G.E. Nevill. Dynamic compressive strength and failure of steel reinforced epoxy composites. Journal of Composite Materials 1971;5:362–77.
- [12] M.V. Hosur, J. Alexander, U.K. Vaidya, S. Jeslani, A. Mayer, Studies on the o.-axis high strain rate compression loading of satin weave carbon/epoxy composites. Composite Structure 2004; 63: 75–85.
- [13] P. Kumar, A. Garg, B.D. Argawal. Dynamic compressive behavior of unidirectional GFRP for various fibre orientations. Mater Lett 1986;4(2):111–6.
- [14] M. Tarfaoui, Experimental investigation of dynamic compression and damage kinetics of glass/epoxy laminated composites under high strain rate compression. In Advances in Composite Materials; 2011. p. 359–82 [Chapter 16].
- [15] M. Tarfaoui, S. Choukri, A. Neme, Damage kinetics of glass/epoxy composite materials under dynamic compression. Journal of Composite Materials 2009;43(10):1137–54. R. Sharma, P. Sircar, and R. B. Pachori, “Automated focal EEG signal detection based on third order cumulant function,” Biomed. Signal Process. Control, vol. 58, p. 101856, 2020.
- [16] J. Arbaoui, M. Tarfaoui, A. EL Malki Alaoui, Mechanical behavior and damage kinetics of woven E-glass/Vinylester laminate composites under high strain rate dynamic compressive loading: experimental and numerical investigation. International Journal of Impact Engineering 2016:44–54.
- [17] J. Arbaoui, M. Tarfaoui, A. EL Malki Alaoui, Dynamical characterisation and damage mechanisms of E-glass/Vinylester woven composites at high strain rates compression. Journals of Composite Materials 2015:1–11.
- [18] P.S. Venkatanarayanan, A. Stanley, Intermediate velocity bullet impact response of laminated glass fibre reinforced hybrid (HEP) resin carbon nano composite, Aerospace Science & Technology. Sep2012, Vol. 21 Issue 1, p75-83. 9p. DOI: 10.1016/j.ast.2011.05.007.
- [19] E. Rolfe, C. Kaboglu, R. Quinn, P.A. Hooper, H. Arora, J.P. Dear, High helocity impact and blast loading of composite sandwich sanels with novel carbon and glass construction in: Journal of Dynamic Behavior of Materials. 2018 4(3):359-372.
- [20] R.S. Sikarwar, R. Velmurugan, Impact damage assessment of carbon fibre reinforced composite with different stacking sequence, Journal of Composite Materials Jan2020, Vol. 54 Issue 2, p193-203. 11p. DOI: 10.1177/0021998319859934.
- [21] R.P.R. Subba, R.T. Sreekantha, K. Mogulanna, I. Srikanth, V. Madhu, R.K. Venkateswara, Ballis- tic impact studies on carbon and E-glass fibre based hybrid composite laminates in plasticity and Impact

- Mechanics, *Procedia Engineering*. 2017 173:293-298 Language: English. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.
- [22] S.G. Vicente, L.S. Paradela, F. Gálvez, Analytical simulation of high-speed impact onto hybrid glass/carbon epoxy composites targets in International Symposium on Dynamic Response and Failure of Composite Materials, DRaF2014, *Procedia Engineering*. 2014 88:101-108 Language: English. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.132.
- [23] F. Gallina, R.S. Birch, M. Alves, Design of a split hopkinson pressure bar. 17th ABCM Int. Congr. Mech. Eng., São Paulo 2003.
- [24] B.A. Gama, S.L. Lopatnikov, J.W. Gillespie, Hopkinson bar experimental technique: a critical review. *Appl Mech Rev* 2004;57:223. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1704626>.
- [25] V.L. Reis, G.M. Cândido, M.V. Donadon, C.V. Opelt, M.C. Rezende, Effect of fibre orientation on the compressive response of plain weave carbon fibre/epoxy composites submitted to high strain rates, *Composite Structure* 203 (2018) 952–959.
- [26] W. Chen, B. Song, Split hopkinson (kolsky) bar, *Mechanical Engineering Series, USA*, DOI 10.1007/978-1-4419-7982-7.
- [27] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoo, M. Trada. A review on the tensile properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Composite Part B – Eng* 2011;42(4):856–73.
- [28] M. Tarfaoui, S. Choukri, A. Neme. Effect of fibre orientation on mechanical properties of the laminated polymer composites subjected to out-of-plane high strain rate compressive loadings, *Composite Science and Technology* 2007, 68(2): 477–485.



## Sabit Hız İle Yörünge Takibi Sağlayan Dört Çubuk Mekanizmasının Hız Kontrolü

### *Speed Control of Four-Bar Mechanism Providing Trajectory Tracking with Constant Velocity*

Halit Hülako<sup>1\*</sup>, Orhan Çakar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hakkari Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [halithulako@hakkari.edu.tr](mailto:halithulako@hakkari.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8194-5433>

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [cakaro@firat.edu.tr](mailto:cakaro@firat.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6947-3875>

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*

Geliş 10 Eylül 2022  
Revizyon 2 Aralık 2022  
Kabul 20 Aralık 2022  
Online 31 Aralık 2022

*Anahtar Kelimeler:*

*Dört Çubuk Mekanizması,  
Değişken Hız Kontrolü,  
Mekanizma Kontrolü,  
Matlab Simscape Multibody.*

#### ÖZ

Yüksek maliyetli otomatik seri üretim makinelerinin sabit hız gerektiren işlemlerinde DC motor ile tahrik edilen dört çubuk mekanizmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Yörüngesi üzerinde sabit hız ile ilerleyen mekanizmaların tasarımları zordur ve ayrıca farklı hız talepleri durumunda da mekanizmanın yeniden boyutlandırılması gerekmektedir. Alternatif olarak mekanizmayı tahrik eden motor hızı kontrol edilerek bu talep gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada, dört çubuk mekanizmasında biyel üzerindeki bir noktanın sabit bir hız ile yörüngesi üzerinde ilerleyebilmesi problemi göz önüne alınmıştır. Bu amaçla krank hızı istenilen yörünge takip hızını sağlayacak şekilde kontrol edilmiştir. Matlab Simscape arayüzü yardımı ile sistem modellenmiş ve krank hızının kontrolünde PID kontrol algoritması kullanılmıştır. Dört çubuk mekanizması için simülasyon modeli oluşturulmuş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received 10 September 2022  
Received in revised form 2 December 2022  
Accepted 20 December 2022  
Available online 31 December 2022

*Keywords:*

*Four-Bar Linkage,  
Variable Velocity Control,  
Mechanism Control,  
Matlab Simscape MultiBody*

#### ABSTRACT

The four-bar mechanisms driven by DC motor are widely used in the processes of high-cost automatic mass production machines that require constant speed. It is difficult to design the mechanism moving on its prescribed trajectory with constant velocity, and however a new design is necessary when a different velocity is desired. Alternatively, this demand can be realized by controlling the speed of motor driving the mechanism. In this study the problem of a coupler point on the four-bar mechanism moving on its trajectory with a constant velocity is considered. For this purpose, the crank speed was controlled to provide the desired trajectory tracking speed. The system were modeled with the help of Matlab Simulink Simscape toolbox and PID control algorithm has been used to control crank angular velocity. A simulation model was created for the four-bar mechanism and successful results were obtained.

*Doi: 10.24012/dumf.1173407*

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Seri imalat yapan makinelerde genellikle yüksek imalat hızı, sabit hız, ürüne has işlem yörüngeleri oluşturma, düşük maliyet gibi gereksinimler vardır. Dört çubuk mekanizmaları endüstride yaygın olarak kullanılan mekanizmalardan biri olup ihtiyaca göre hareket, fonksiyon ve yörünge üreten olarak sınıflandırılır [1]. Bu mekanizmalar, giriş uzuvlarının yani kranklarının sabit hızda döndüğü kabul edilerek tasarlanırlar. Bilindiği üzere dört çubuk mekanizmasında giriş uzvunu tahrik eden motora sabit voltaj verilse bile mekanizmanın kendi dinamiğinden dolayı, giriş uzvunun istenen hızı etrafında dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu hız dalgalanmaları mekaniksel olarak kranka volan eklenerek kısmen giderilebilmektedir. Ancak günümüzde özellikle yüksek hızlı, hafif ve esnek uzuvlu mekanizmaların kullanım gereksinimi nedeni ile bu yeterli olamamaktadır. Günümüzde ölçüm araçları ve kontrol mühendisliğinin gelişimi ile birlikte bu hız dalgalanmaları mekanizmayı tahrik eden motorun kontrolü ile daha etkili bir şekilde giderilebilmektedir. Bunun için krank hızı anlık olarak ölçülüp referans değer ile karşılaştırılarak mevcut hataya göre uygun kontrol sinyali üretilir ve mekanizmayı tahrik eden motora uygulanarak hız dalgalanması giderilmeye çalışılır. Tao ve Sadler [2], DC motor ile tahrik edilen dört çubuk mekanizmasının krank hızında meydana gelen hız dalgalanmalarını PID kontrol algoritmasını kullanarak gidermeye çalışmıştır. Aynı amaçla bulanık mantık [3], kayan kipli kontrol [4], hareketli kayan kipli kontrol [5], geri adımlama (backstepping) kontrol [6] ve bu kontrol tekniklerinin karma bir şekilde uygulandığı [7],[8] çalışmalar mevcuttur.

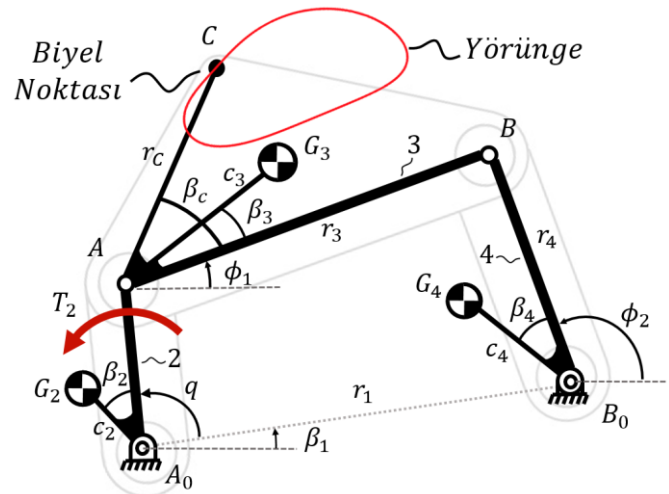
Yörünge oluşturan dört çubuk mekanizmaları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür mekanizmalarda çoğunlukla biyel olarak isimlendirilen ara bağlantı uzvu üzerindeki bir noktadan faydalanılır ve bu noktanın çizdiği yörüngeler biyel eğrileri olarak isimlendirilir. Şekil 1’ de yörünge üreten dört çubuk mekanizmasının kinematik diyagramı verilmiştir. İki ve dört uzuvlarını birbirine bağlayan üç numaralı uzuv yani biyel üzerindeki C noktası bulunduğu geometrik yere göre farklı eğriler oluşturmaktadır. Giriş uzvu sabit hızda hareket ettirildiğinde bu noktanın hızı, uzuv boylarına ve C ‘nin geometrik konumuna bağlı olarak takip ettiği yörünge üzerinde değişkenlik göstermektedir.

Ancak endüstride bu noktanın takip ettiği yörüngeyi belirli bir kısmında veya tamamında sabit bir hızla hareket etmesinin istendiği durumlarda vardır. Bölgesel bir kısımda sabit hız verebilen mekanizmalar tasarlamak [9],[10] mümkün olmakla birlikte mekanizmanın dinamiğinden dolayı kontrol olmadan bu da tam olarak sağlanamaz. Gerçek uygulamalarda krank hızını ölçmek kolay iken bir yörünge üzerinde hareket eden bir noktanın hızını ölçmek oldukça zor ve maliyetlidir. Bu bakımdan biyel noktasının yörüngeyi sabit bir hızla takip etmesi değişken krank hızı ile sağlanabilir. Bu da mekanizmayı süren motorun kontrolü ile gerçekleştirilebilir. Bunun için bu biyel noktasının hızı ile krank hızı arasındaki kinematik bağıntıdan değişken krank hızı profili elde edilir ve bu hız profili referans alınarak krank hızı kontrol edilebilir. Peón-Escalante vd. [11], dört çubuk

mekanizmasında biyel üzerinde bir noktanın takip ettiği yörünge üzerindeki sabit hızla ilerlemesini sağlamak için krankın hızını kontrol etmeye çalışmışlardır. Bunun için DC motor ile sürülen dört çubuk mekanizmasının dinamiği analitik olarak elde edilmiş ve PID algoritması ile istenilen değişken krank hızı sağlanmaya çalışılmıştır. Kısa bir süre önce de Bañuelos vd. [12], aynı problem için yaptıkları deneysel çalışmalarını sunmuşlardır. Bu çalışmalarında biyel noktasının hızı anlık kamera görüntüleri ile belirlenmiş ve PID kontrol algoritması kullanılmıştır.

Mekanizmaların analizinde alışılan yol sistemin matematiksel modelinin elde edilmesi ve bunların sayısal yöntemlerle çözülmesidir. Ancak özellikle serbestlik dereceleri yüksek karmaşık dinamik sistemlerin analizleri zordur. Dinamik problemleri çözmenin diğer bir yolu da simülasyon programlarıdır. Matlab bu tür çalışmalar için geniş bir ortam sağlayabilmektedir. Matlab Simulink ile hem kontrol yapısı hem de işleyen dinamik model aynı ortamda blok yapılarla oluşturulup çalıştırılabilmektedir. Simscape Multibody ise kuvvet, sensör, mafsal ve uzuvlar gibi bloklar ile sistem modellendikten sonra hareket denklemini formüle eder ve aynı zamanda çözer [13]. Böylece kullanıcının mekanizmanın karmaşık dinamik denklemlerini elde etmesine gerek kalmamaktadır.

Bu çalışmada, DC motor ile tahrik edilen bir dört çubuk mekanizmasında biyel üzerindeki bir noktanın takip ettiği yörünge boyunca belirlenen sabit bir hızda hareketinin sağlanması problemi dikkate alınmıştır. Öncelikle biyel noktasının hızı ile krank hızı arasındaki kinematik ilişki elde edilmiştir. Buna göre belirlenen bir hız için elde edilen değişken krank hızı profili referans alınarak PID kontrol tekniği ile krank hızı kontrol edilmiştir. Farklı olarak bu çalışmada mekanizmanın karmaşık dinamik denklemleri analitik olarak elde edilmeyip analiz için Matlab Simscape Multibody arayüzünden faydalanılmıştır. Belirli bir biyel noktası hızı için sayısal benzetim çalışması yapılmıştır.



Şekil 1: Dört çubuk mekanizmasının kinematik diyagramı

## Kinematik Modelleme

Bu bölümde kontrol için referans olmak üzere krank hızı ile biyel üzerindeki noktanın hızı arasındaki kinematik ilişki elde edilecektir. Bunun için önce mekanizmanın vektörel çevrim denklemlerinden skaler bağ denklemleri ve uzuvların hızlarını giriş uzvunun hızına bağlı olarak bulunmasına yarayan hız etki katsayıları elde edilmiştir. Şekil 1'deki dört çubuk mekanizmasının vektörel çevrim denklemi üstel formdaki karmaşık sayılar ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{A}_0\mathbf{A} + \mathbf{AB} = \mathbf{A}_0\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_0\mathbf{B} \quad (1)$$

$$r_2 e^{iq} + r_3 e^{i\phi_1} = r_1 + r_4 e^{i\phi_2} \quad (2)$$

Bu vektörel denklemden iki adet skaler denklem elde edilir.

$$f_1(q, \phi_1, \phi_2) = r_2 \cos q + r_3 \cos \phi_1 - r_1 - r_4 \cos \phi_2 = 0 \quad (3)$$

$$f_2(q, \phi_1, \phi_2) = r_2 \sin q + r_3 \sin \phi_1 - r_4 \sin \phi_2 = 0 \quad (4)$$

Burada  $r_i$ ,  $i=1,2,3,4$  uzuv boylarını,  $q$  krank açısını ve  $\phi_i$ ,  $i=1,2$  sırasıyla 3 ve 4 nolu uzuvların açılarını göstermektedir. Verilen bir  $q$  için bilinmeyen konum parametreleri  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  bu iki denklemin çözümünden elde edilebilir. Diğer taraftan 3 ve 4 numaralı uzuvların açısal hızları  $\dot{\phi}_1$  ve  $\dot{\phi}_2$ , krank hızı  $\dot{q}$  ya bağlı olarak hız etki katsayıları kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{\phi}_1 = g_1 \dot{q}, \quad \dot{\phi}_2 = g_2 \dot{q} \quad (5)$$

Hız etki katsayıları ise aşağıdaki gibi hesap edilir:

$$\mathbf{g} = -\mathbf{J}^{-1}\mathbf{f}' \quad (6)$$

Burada vektör ve matrisler kalın harflerle yazılmış olup  $\mathbf{J}$  Jakobi matrisi,  $\mathbf{g}$  hız etki katsayıları vektörü ve  $\mathbf{f}'$  bağ denklemlerinin giriş değişkeni  $q$  ya göre türevini ihtiva eden vektördür.

$$\mathbf{g} = \{g_1, g_2\}^T, \quad \mathbf{f}' = \left\{ \frac{\partial f_1}{\partial q}, \frac{\partial f_2}{\partial q} \right\}^T \quad (7)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \phi_j}, \quad (i, j = 1, 2) \quad (8)$$

Dört çubuk mekanizması için bu parametreler aşağıdaki gibidir [5]:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -r_3 \sin \phi_1 & r_4 \sin \phi_2 \\ r_3 \cos \phi_1 & -r_4 \cos \phi_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{f}' = \begin{bmatrix} -r_2 \sin q \\ r_2 \cos q \end{bmatrix}$$

Denklemlerin (6)'nın çözülmesi ile dört-çubuk mekanizması için hız katsayıları aşağıdaki gibi bulunur:

$$g_1 = -\frac{r_2 \sin(q-\phi_2)}{r_3 \sin(\phi_1-\phi_2)}, \quad (10)$$

$$g_2 = -\frac{r_2 \sin(q-\phi_1)}{r_4 \sin(\phi_1-\phi_2)} \quad (11)$$

Biyel üzerindeki C noktasının konum vektörü:

$$\mathbf{A}_0\mathbf{C} = \mathbf{A}_0\mathbf{A} + \mathbf{AC} \quad (12)$$

$$r_c = r_2 e^{iq} + r_c e^{i(\phi_1+\beta_c)} \quad (13)$$

Bu denklemin zamana göre türevi C noktasının hızını verecektir:

$$V_c = ir_2 \dot{q} e^{iq} + ir_c \dot{\phi}_1 e^{i(\phi_1+\beta)} \quad (14)$$

Bu denklemin gerçel ve sanal kısımları ayrı ayrı yazılarak hızın bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$V_{c_x} = -r_2 \dot{q} \sin q - r_c \dot{\phi}_1 \sin(\phi_1 + \beta_c) \quad (15)$$

$$V_{c_y} = r_2 \dot{q} \cos q + r_c \dot{\phi}_1 \cos(\phi_1 + \beta_c) \quad (16)$$

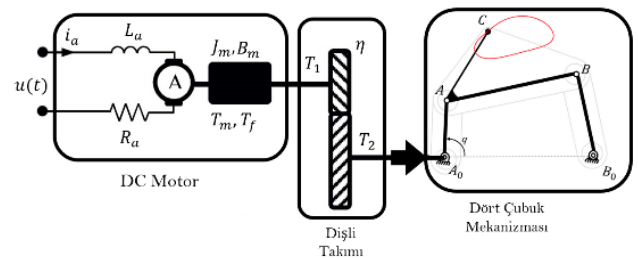
Bu denklemlerden krank hızı, C noktasının hızına bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\dot{q} = \sqrt{\frac{V_{c_x}^2 + V_{c_y}^2}{r_2^2 + r_c^2 g_1^2 + 2r_2 r_c g_1 \cos(q - \phi_1 - \beta_c)}} \quad (17)$$

Denklemler (17) verilecek bir  $V_c (= V_{c_x}^2 + V_{c_y}^2)$  hızına bağlı olarak krankın her bir konumu  $q$  için krank hızının alması gereken değeri verecektir. Böylece C noktasının yörüngesi boyunca sabit bir hızla hareket edebilmesi için değişken krank hızı profili elde edilebilir. Bu değişken krank hızı kontrol algoritması için referans olacaktır. Bir başka deyişle krank hızı bu profili sağlayacak şekilde kontrol edilirse biyel noktasının istenilen sabit hız ile hareket etmesi sağlanabilecektir. Burada gerekli olan konum ve hız bilgileri Matlab Simscape Multibody simülasyon ortamında oluşturulan mekanizma modelinden elde edilmektedir. Aşağıdaki bölümde incelenen sistemin Simulink ile modellenmesi ve kontrol edilmesi açıklanmıştır.

## Dinamik Modelleme Ve Kontrol

Daha önce de ifade edildiği gibi dinamik analiz için alışılmış olarak mekanizmanın hareket denklemleri elde edilir ve bu denklemler sayısal olarak çözülür. Krank hızının kontrolü için de mekanizmayı tahrik eden motorun modeli redüktör ile birlikte sisteme dahil edilir. Bu çalışmada, farklı olarak mekanizmanın karmaşık hareket denklemleri elde edilmeyecek olup bu iş Matlab Simscape Multibody Simülasyon arayüzüne bırakılacaktır. Bu çalışmada mekanizmanın DC motor ile tahrik edildiği ve motorun bir redüktör ile kranka bağlandığı göz önüne alınmıştır. DC motor, redüktör ve mekanizmadan oluşan mekatronik sistem şematik olarak Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 2: DC motor-redüktör-mekanizma modeli

Bir DC motorun matematiksel modeli Kirschhof'un gerilim yasasına göre Denklem (18) ile verilir [2]-[5]:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + n K_g \dot{q} \quad (18)$$

Burada  $V_a$  giriş gerilimi,  $R_a$ ,  $L_a$  ve  $i_a$  sırasıyla armatür direnci, indüktansı ve akımıdır.  $K_g$  motor gerilim sabiti ve  $n$  redüktörün giriş hızının çıkış hızına ve aynı zamanda çıkış torkunun giriş torkuna oranıdır:

$$n = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (19)$$

Diğer taraftan DC motor ve redüktörden oluşan sistemin çıkış milindeki tork ifadesi Newton'un II. hareket yasasına göre aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$T_2 = n(-n J_m \ddot{q} - n B \dot{q} + T_m - T_f) \quad (20)$$

Bu tork aynı zamanda mekanizmayı tahrik etmek için kranka uygulanan torktur. Burada  $J_m$  rotorun kütle atalet momenti,  $B$  yataklardaki viskoz sürtünme,  $T_f$  fırça sürtünmesi, dişlilerdeki sürtünme ve kuru yatak sürtünmelerini ihtiva eden mekaniksel kayıp torkudur. Motor tarafından üretilen tork  $T_m$  ise motor tork sabiti  $K_m$  olmak üzere aşağıdaki gibidir:

$$T_m = K_m i_a \quad (21)$$

DC motor-redüktör ve dört çubuk mekanizmasından oluşan sistemin kontrol yapısı Şekil 3' te gösterilmiştir.  $V_{C_{ist}}$ , C biyel noktasının istenen yörünge takip hızıdır. Hız yörünge jeneratörünün çıkışı olan  $\dot{q}_{yör}$  ise Denklem (17) ile elde edilen referans krank hızıdır. Kontrolör çıkışında,  $u(t)$  sinyali motor girişine uygulanan gerilimdir. Bu voltaj sinyaline karşılık motor dinamiğinden türetilen tork dört

çubuk mekanizması girişine yani kranka uygulanmaktadır. Mekanizmanın çıkışından alınan konum değerleri yörünge üreticiye geri beslenirken krank hızı referans değerle karşılaştırılarak kontrolcüye gönderilir.

Bu çalışmada krank hızını kontrol etmek için PID kontrol algoritması kullanılmış olup  $u(t)$  kontrol işareti aşağıdaki gibi ifade edilir:

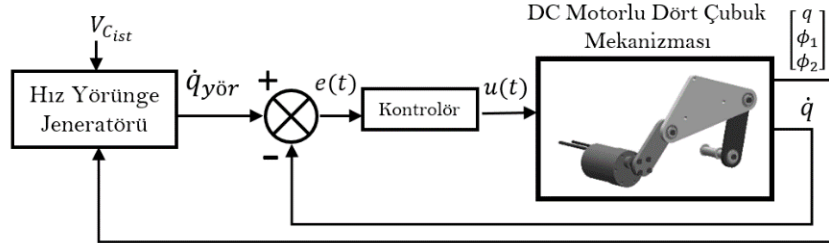
$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (22)$$

Burada  $K_p$  oransal kazanç (proportional gain),  $K_d$  türevsel kazanç (derivative gain),  $K_i$  integral kazanç (integral gain) ve  $e(t)$  ise hata olup bu çalışmada krankın referans hızı  $\dot{q}_{yör}$  ile anlık hızı  $\dot{q}$  arasındaki fark ile ifade edilmiştir:

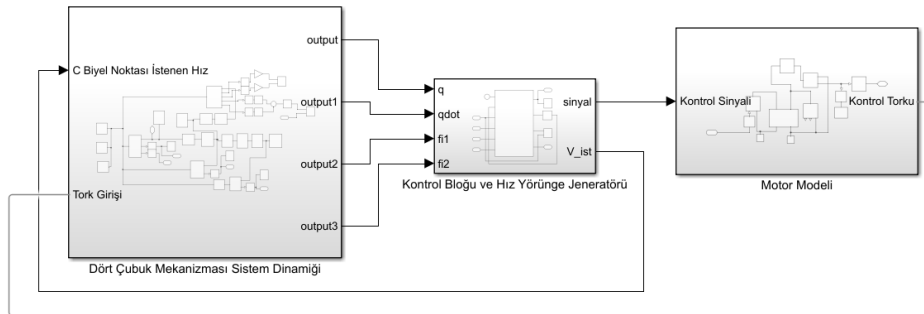
$$e(t) = \dot{q}_{yör} - \dot{q} \quad (23)$$

### Sistemin Simulink Modeli

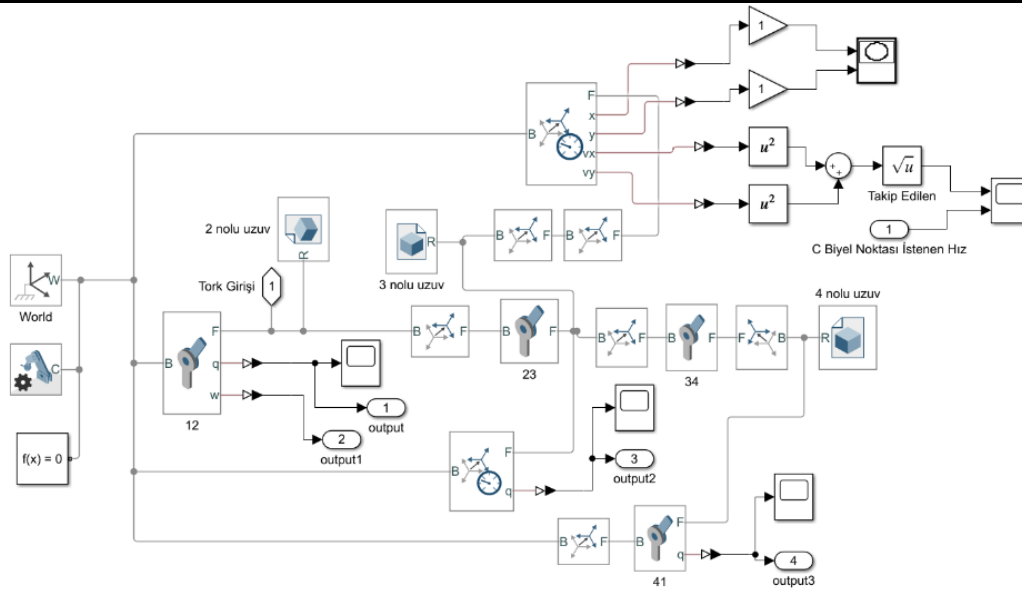
İncelenen sistemin Matlab Simulink Simscape ile oluşturulan modelinin ana blok yapısı Şekil 4' te verilmiştir. Ana model mekanizma bloğu, hız yörünge üretici ve kontrol bloğu ile DC motor modelinden oluşmaktadır. **Kontrol ve Hız Jeneratörü** bloğu **Dört Çubuk Mekanizması Sistem Dinamiği** bloğundan beslenmektedir. Gerekli olan açısal hız ve konum bilgileri bu bloktan alınmaktadır. **Kontrol bloğu ve Hız Yörünge Jeneratörü** çıkışındaki kontrol sinyali **Motor Modeli** girişine verilmektedir. **Motor Modeli** çıkışındaki tork kontrol sinyali **Dört Çubuk Mekanizması Sistem Dinamiği** bloğunu beslemektedir. Bu blokların iç yapısı da sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 de verilmiştir.



Şekil 3: DC motor-redüktör ve dört çubuk mekanizmasından oluşan sistemin kontrol yapısı



Şekil 4: DC motor kontrollü, değişken hız yörüngesini izleyen dört çubuk mekanizmasına ait ana model yapısı



Şekil 5: Dört Çubuk Mekanizması Sistem Dinamiği alt sistemine ait blok diyagramı.

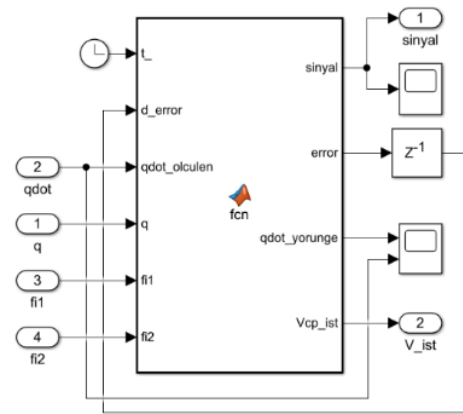
Şekil 5' te verilen blok yapısı mekanizmanın hem kinematikliğini hem de dinamikliğini içermektedir ve mekanizmaya ait tüm konum ve hız bilgileri alınabilmektedir.

Mekanizma bloğu, genel olarak mekanizmayı oluşturan katı cisimler, mafsallar ve bunları konumlandırmak için kullanılan **Rigid Transform** bloklarından oluşmaktadır. Katı cisimler, SolidWorks gibi katı modelleme programları ile oluşturulabildiği gibi doğrudan Simulink'in hazır kütüphanesinden de eklenebilirler. Simscape Multibody ortamında bulunan bu 3B nesnelere ait bloklarda kütle değeri girildikten sonra, kütle merkezi, kütleli atalet momenti gibi bilgiler otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu bilgiler daha katı cismin 3B modeli oluşturulurken belirlenen noktalarına yerleştirilen referans eksene bağlı olarak türetilmektedir. Yine uzuvların konumları ve hızları gibi kinematik bilgiler bu referans eksenlere bağlı olarak alınabilmektedir. Mekanizmadaki mafsallar da komşu iki uzuv üzerindeki eksenler arasına yerleştirilir. Şekil 5' te "12", "23", "34" ve "41" ile gösterilen bloklar dört çubuk mekanizmasına ait mafsal bloklarını temsil etmektedir. Mekanizmayı tahrik eden tork girişi ve sürtünmeler de bu mafsal bloklarında tanımlanabilmektedir. Böylece Simscape Multibody uzayında birbirine bağlanan nesnelere simülasyon çalıştığında kuvvetlerin etkisiyle konumları değişir. Mafsallar yönelimleri değişen eksenlerin değişim miktarını sürekli takip eder.

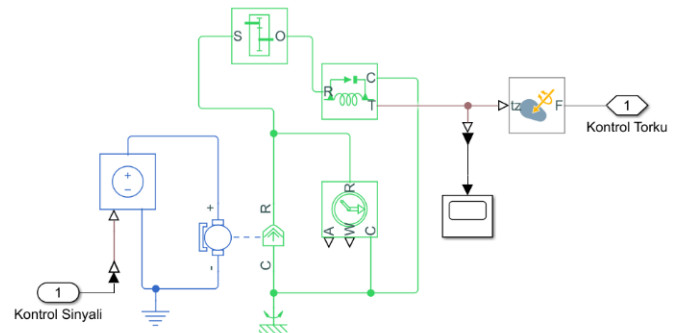
2 nolu uzvun takip etmesi gereken hız yörünge jeneratörü ve kontrol algoritmasının uygulandığı **Kontrol Bloğu ve Hız Yörünge Jeneratörü** isimli Matlab fonksiyon bloğu Şekil 6' da verilmiştir. Bu fonksiyon giriş uzvunun izlemesi gereken referans hız yörüngesini hesaplayabilmek için gerekli mekanizmaya ait konum bilgilerini ( $q, \phi_1, \phi_2$ ) Şekil 5' teki mekanizma bloğundan almaktadır. PID algoritması da bu blok içerisinde yer almaktadır. Buradan elde edilen kontrol sinyali bu bloğun çıkışıdır.

Matlab Simscape' te oluşturulan DC motor ve redüktöre ait dinamik modelin blok şeması da Şekil 7' de verilmiştir. DC

motor bloğunda rotor ataleti, sönüm, indüktans, direnç gibi motora ait parametrelerin değerleri girilmektedir. Bu bloğun girişi kontrol bloğundan gelen kontrol sinyaline bağlıdır. Bu bloğun çıkışı mekanizmayı süren kontrol torkudur. Bu tork "12" isimli döner mafsala bloğuna verilmektedir.



Şekil 6: Kontrol Bloğu ve Hız Yörünge Jeneratörü alt sistemine ait fonksiyon bloğu



Şekil 7: DC Motor Modeli alt sistemine ait blok diyagramı



## Sayısal Benzetim Çalışması

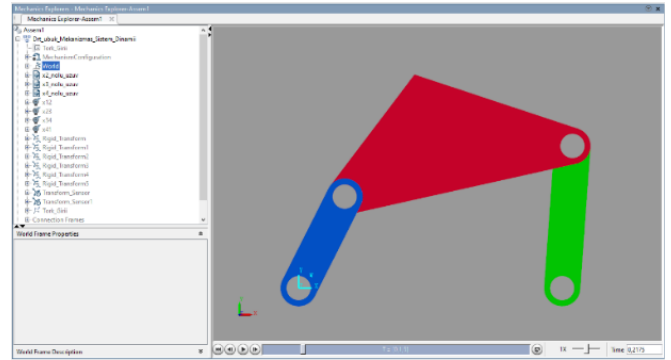
Bu bölümde, DC motor-redüktör-mekanizma dan oluşan sistemin kontrolü için yukarıda oluşturulan Simulink modeli kullanılarak sayısal benzetim çalışması yapılmıştır. Mekanizma ve DC motora ait parametreler Tablo 1’ de verilmiş olup bu parametreler Simulink modelinde ilgili bloklarda tanımlanmıştır. Uzun boyları ve kütle değerleri [11] nolu referanstan alınmıştır. Mekanizmanın 3B katı modeli SolidWorks ile oluşturulmuş ve Simscape ile Simulink ortamına aktarılmıştır. Uzunların kütsel atalet moment değerleri doğrudan Simulink tarafından uzun biçim ve kütle bilgilerinden otomatik olarak elde edilmiştir. Mekanizma mafsallarında sürtünme olmadığı ve yerçekimin mekanizmanın çalışma düzleminde aşağı doğru etki ettiği varsayılmıştır. Motor mili çıkışında 1:50 oranında hız düşümü sağlayan bir redüktör bulunmaktadır. Motor voltajı 12 V olduğundan kontrol gerilimi bu voltaj ile sınırlanmıştır.

Benzetim çalışmasındaki biyel üzerindeki C noktasının takip ettiği yörünge Şekil 1’ de görülen ile aynı olup istenilen sabit hız  $V_{C_{ist}}=0.3$  m/s olarak alınmıştır. Bu çalışmada tasarlanan PID kontrolcüde oransal, türevsel ve integral katsayıları deneme yanılma tekniği ile sırasıyla  $K_p=0.3$ ,  $K_d=0.1$ ,  $K_i=2$  olarak belirlenmiştir.

Mekanizmanın giriş uzvu sıfır radyan konumunda durgun halde iken simülasyon başlatılmıştır. Yani başlangıç şartları sıfır alınmıştır. Şekil 8’de sistem çalışırken alınan bir ekran görüntüsü verilmiştir. C biyel noktasının 1.5 saniye boyunca olan hız değişimi Şekil 9’ da verilmiştir. Görüldüğü üzere, simülasyon boyunca C biyel noktasının istenilen hız değeri olan  $0.3$  m/s etrafında yaklaşık  $\pm 0.002$  m/s civarında oldukça küçük salınımlar yapmaktadır. En büyük aşma değeri  $0.341$  m/s, kontrolün kabul edilebilir tolerans aralığına yerleşme zamanı  $0.42$  s ve yükselme zamanı ise  $0.008169$  s olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre C noktasının hızı  $V_C$ , istenilen referans hız değeri etrafında ihmal

edilebilecek kadar küçük bir hata payı ile başarılı bir şekilde kontrol edilmiştir.

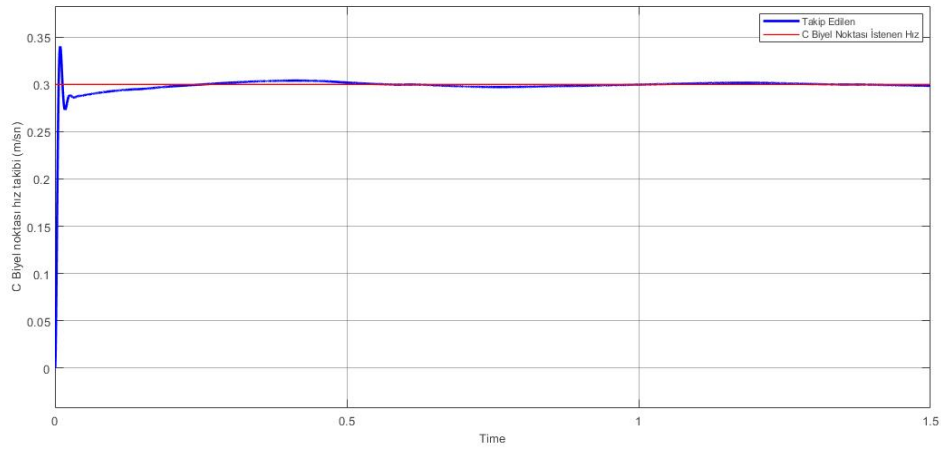
C biyel noktasının yörüngesi boyunca  $V_{C_{ist}}=0.3$  m/s sabit hızda hareket edebilmesi için gerekli değişken krank hızı profili  $\dot{q}_{yör}$  ile sistemin kontrol edilmesi sonucu elde edilen krank hızı  $\dot{q}$  nın karşılaştırması da Şekil 10’ da verilmiştir. Bu grafikte de her iki hızın hemen hemen örtüştüğü görülmektedir. Kontrol süresince 2 numaralı giriş uzvuna uygulanan  $T_2$  kontrol torkunun zamanla değişim grafiği Şekil 11’ de verilmiştir. Buna göre durgun haldeki dört çubuk mekanizmasını istenilen hızda harekete geçirmek için en fazla  $0.75$  Nm tork uygulanması gerekmektedir. Yerleşme zamanından sonra gerekli tork  $\pm 0.1$  Nm civarında salınım yapmaktadır. DC motor girişine uygulanan kontrol geriliminin zamanla değişim grafiği de Şekil 12’ de verilmiştir. Sistemin ilk hareketinde  $1.5$  V’ luk bir gerilime ihtiyaç varken sonrasında  $0.18$  V civarında değişim göstermektedir. Bu düşük tork ve gerilim değerlerinin seçilen mekanizmanın hafifliğinden ve motor devir sayısının yüksek olmasından kaynaklandığını belirtmek gerekir.



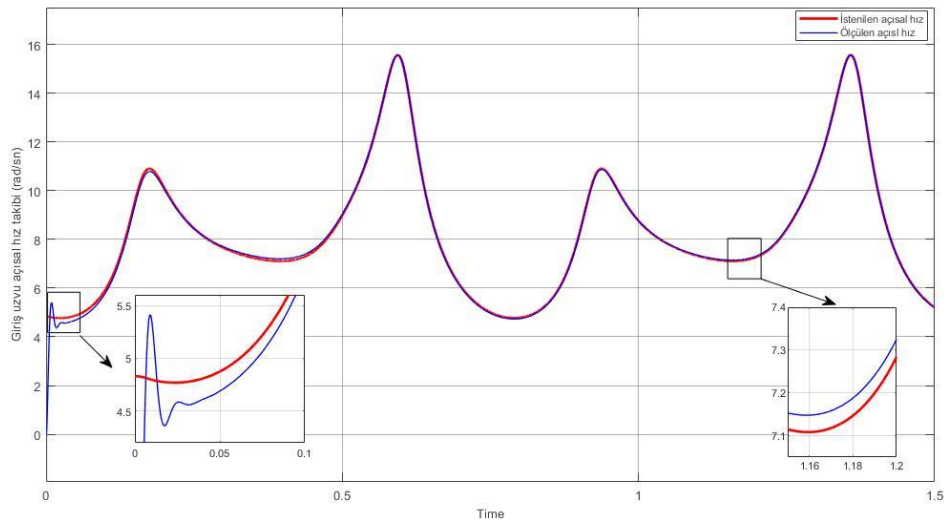
Şekil 8: Matlab Simscape Multibody’de tasarlanan Dinamik sisteme ait üç boyutlu simülasyon modeli

Tablo 1: Dört çubuk mekanizması ve DC motor modeline ait parametre değerleri

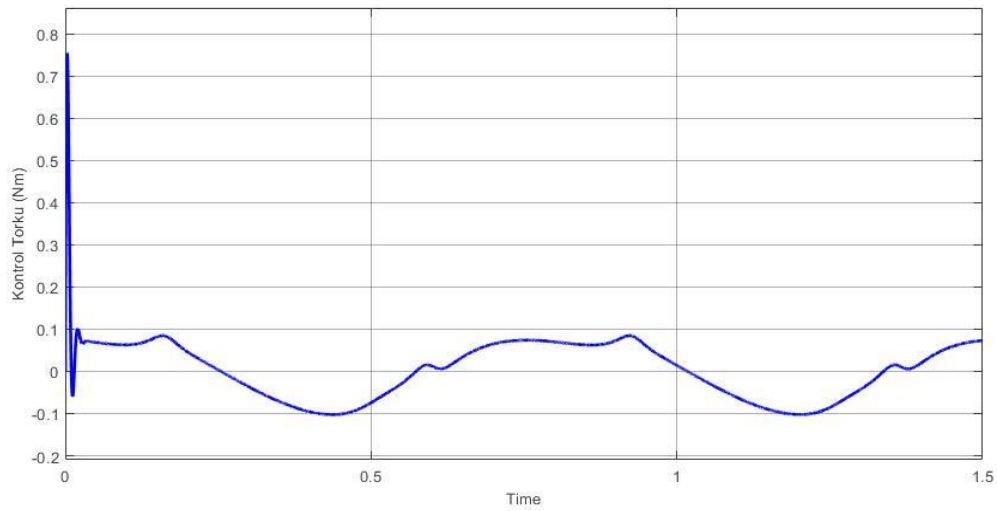
Mekanizma parametreleri						
Parametre	Uzun no (i)					
	1	2	3	4		
$r_i$ (mm)	108.91	42.26	96.44	58.78		
$c_i$ (mm)		21.13	0.04781	29.39		
$m_i$ (kg)		0.03349	0.2586	0.00547		
$J_i$ (kg-m <sup>2</sup> )		0.00000962	0.000224	0.0000023		
$\beta_i$ (rad)	0.0	0.0	0.2268	0.0		
DC Motor parametreleri						
$R$	$L$	$K_m$	$K_g$	$J_m$	$T_f$	$B$
( $\Omega$ )	(H)	(Nm/A)	(Vs)	(kgm <sup>2</sup> )	(Nm)	(Nms)
0.0379	0.0001	6.9724e-4	6.9724e-4	3.409e-7	0.00	1.132e-6
Güç (kW)	Tork (Nm)	Hız (rpm) (redüktörlü)	Voltaj (V)	Akım (A)		
0.04	1.47	330	12	<6.0		



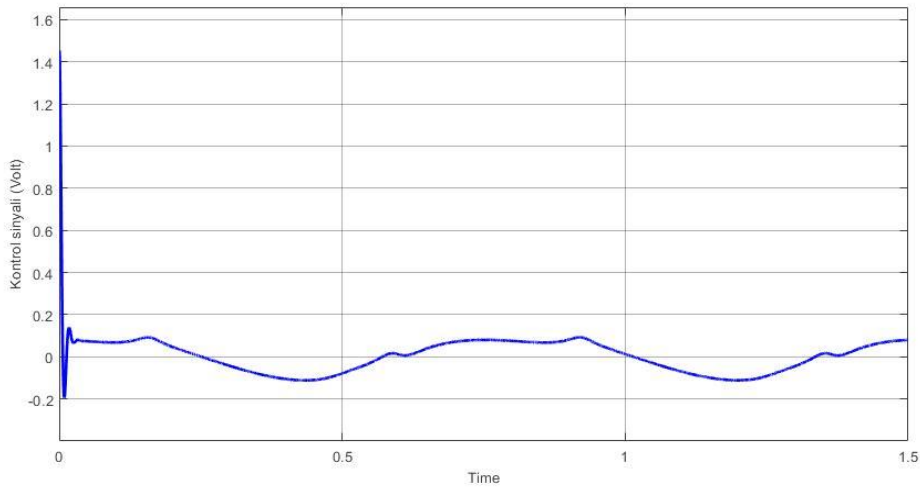
Şekil 9: C biyel noktasının istenen ve kontrol sonucu elde edilen hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 10: Sabit yörünge hızı için gerekli krank hızı ile kontrol sonucu elde edilen krank hızının karşılaştırılması.



Şekil 11: Sabit yörünge hızı için kranka uygulanması gereken  $T_2$  kontrol torkunun zamanla değişimi.



Şekil 12: Mekanizmayı tahrik eden DC motora uygulanan kontrol geriliminin zamanla değişimi.

## Sonuç

Bu çalışmada bir dört çubuk mekanizmasında C biyel noktasının yörüngesi boyunca sabit hızla hareket etmesi için gerekli değişken krank hızı profili elde edilmiş ve PID yöntemi ile kontrolü yapılmıştır. Bu amaçla Matlab Simscape arayüzü kullanılmıştır. Böylece mekanizmanın karmaşık dinamik denklemlerinin elde edilmesine gerek kalmadan analiz yapılabilmektedir. Yapılan sayısal benzetim çalışmasında giriş uzvu krank, değişken olan açısal hız profilini takip etmiş ve C biyel noktası tüm yörüngesi boyunca istenilen  $V_{C_{ist}}=0.3$  m/s hızından çok küçük sapmalarla hareket edebilmiştir. Böylece incelenen sistemin karmaşık dinamik modeli oluşturulmadan basit bir şekilde Simscape Multibody kullanılarak oluşturulabileceği ve sonuçların yüksek doğrulukla elde edilebileceği gösterilmiştir. Bununla beraber gerçek bir sistem üzerinde de deneyerek sonuçların incelenmesi faydalı olacaktır. Bu bağlamda yazarların gerçek bir model üzerinde deneysel çalışmalarını devam ettirmektedir.

## Kaynakça

- [1] E. Söylemez, *Makine Teorisi-I Mekanizma Tekniği*, MMO yayınevi, 2021.
- [2] J. Tao and J.P. Sadler, “Constant speed control of a motor driven mechanism system”, *Mechanisms and Machine Theory*, vol. 30, no. 5, pp. 737-748, 1995.
- [3] Ö. Gündoğdu and K. Erentürk, “Fuzzy Control of a dc motor driven four-bar mechanism”, *Mechatronic*, Cilt:15, s:423-438, 2005.
- [4] G. Şevkat ve S. Telli, “Elektrik Motoru İle Tahrik Edilen Dört Çubuk Mekanizmasının Kayan Kip Hız Kontrolü”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Dergisi*, Cilt:13, No:2, s: 15-26, 2008.
- [5] O. Çakar and A.K.Tanyildizi, “Application of moving sliding mode control for a DC motor driven four-bar mechanism”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol.10, no. 3, pp. 1-13, 2018.
- [6] M. Salah, A. Al-Jarrah, E. Tatlicioglu et al. “Robust Backstepping Control for a Four-Bar Linkage Mechanism Driven by a DC Motor”, *J Intell Robot Syst*, vol. 94, pp. 327-338, 2019.
- [7] G.O Koca, Z.H Akpolat and M. Özdemir, “Type-2 fuzzy sliding mode control of a four-bar mechanism”, *Int J Model Simul*, vol. 31, pp. 60-68, 2011.
- [8] A. Al-Jarrah, M. Salah, K.S. Banihani, et al. “Applications of various control schemes on a four-bar linkage mechanism driven by a geared DC motor”, *WSEAS Trans Syst Contr*, vol. 10, pp. 584-597, 2015.
- [9] C.F. Chang, “Synthesis of adjustable four-bar mechanisms generating circular arcs with specified tangential velocities”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 36, no. 3, pp. 387-395, 2001.
- [10] H.S. Yan and R.C. Soong, “Kinematic and dynamic design of four-bar linkages by links counterweighing with variable input speed”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 36, no. 9, pp. 1051-1071, 2001.
- [11] R. Peón-Escalante, M. Flota-Bañuelos, L.J. Ricalde, C. Acosta, G. S. Perales, “On the coupler point velocity control of variable input speed servo-controlled four-bar mechanism”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol.8, no.11, pp.1-9, 2016.
- [12] M. Flota-Bañuelos, R. Peón-Escalante, L.J. Ricalde, B.J. Cruz, R. Quintal-Palomo, J. Medina, “Vision-based control for trajectory tracking of four-bar linkage”, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*, vol. 43, no.324, pp. 1-11, May. 2021.
- [13] Matlab,2021,(n.d.).<https://www.mathworks.com/products/simmechanics.html>.



# Farklı Eğimlerdeki Bantlı Konveyörlerde Kapasitenin Ayrık Elemanlar Metoduyla (DEM) İncelenmesi

## Investigation of the Conveyor Capacity in Different Angle Belt Conveyors with Discrete Element Method (DEM)

Enes SEZER<sup>1\*</sup>, Berna BOLAT<sup>2</sup>, Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [ensesezer97@hotmail.com](mailto:ensesezer97@hotmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7004-4688>

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [balpan@yildiz.edu.tr](mailto:balpan@yildiz.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9520-7431>

<sup>3</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [birgul@yildiz.edu.tr](mailto:birgul@yildiz.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2459-8708>

### MAKALE BİLGİLERİ

### ÖZ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ekim 2022  
Revizyon 2 Kasım 2022  
Kabul 28 Kasım 2022  
Online 31 Aralık 2022

#### Anahtar Kelimeler:

Bantlı Konveyörler, Ayrık Elemanlar Metodu (DEM), Konveyör Kapasitesi

Bantlı konveyörlerde birim zamana bağlı olarak taşınan malzeme miktarını ifade eden konveyör kapasitesi; konveyörün eğimine bağlı olarak değişmektedir. Eğimli olarak çalışan konveyörlerin kapasitesi, genel bir eğim faktörü (k) tablosu üzerinden seçilen değerler kullanılarak bulunmaktadır. Buradaki eğim faktörü konveyör tasarımı ve taşınan malzeme özelliklerine bağlı olmadan, tüm konveyörler için aynı olarak kullanılmaktadır. Böylelikle konveyör kapasitesi yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada hedeflenen, konveyör kapasitesinin genel olarak kullanılan eğim faktörüne ihtiyaç duyulmadan, Ayrık Elemanlar Metodu (Discrete Element Method) (DEM) kullanılarak her açı için numerik olarak bulunmasıdır. Çalışmada farklı eğimlerdeki konveyörler için kapasite değerleri teorik ve numerik olarak bulunmuştur. Numerik olarak bulunan kapasite değerleri yardımıyla konveyörün tasarımına ait eğim faktörü elde edilmiştir. Elde edilen eğim faktörü değeri, endüstride yaygın olarak kullanılan genel eğim (teorik) faktörü değerleriyle kıyaslanmıştır. Numerik olarak elde edilen konveyör kapasitelerinin ve eğim faktörünün, teorik yöntemdeki değerlerden daha düşük olduğu bulunmuştur.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article history:

Received 5 October 2022  
Received in revised form 2 November 2022  
Accepted 28 November 2022  
Available online 31 December 2022

#### Keywords:

Belt Conveyors, Discrete Element Method (DEM), Conveyor Capacity

Capacity in belt conveyors, which implies the amount of material conveyed per second, changes depending on the conveyor angle. The capacity of the inclined conveyors is calculated via using a general inclination coefficient (k), which is taken from the table. The inclination coefficient here is used for various types of conveyors, regardless of the design of the conveyor and properties of the bulk material, hence features an approximation in the estimation of the capacity. In this study it is aimed to acquire the capacity of the conveyor for each angle numerically with Discrete Element Method (DEM), without the need of an inclination coefficient. The capacities of the belt conveyors with different inclination angles were found theoretically and numerically in the study. The design-specific inclination coefficient of the conveyor was acquired via using the numerical conveyor capacities, which was later compared with the general inclination coefficient (theoretical). The numerical conveyor capacity and inclined coefficient were to be found lower than their theoretical counterparts.

Doi: 10.24012/dumf.1184931

\* Sorumlu Yazar

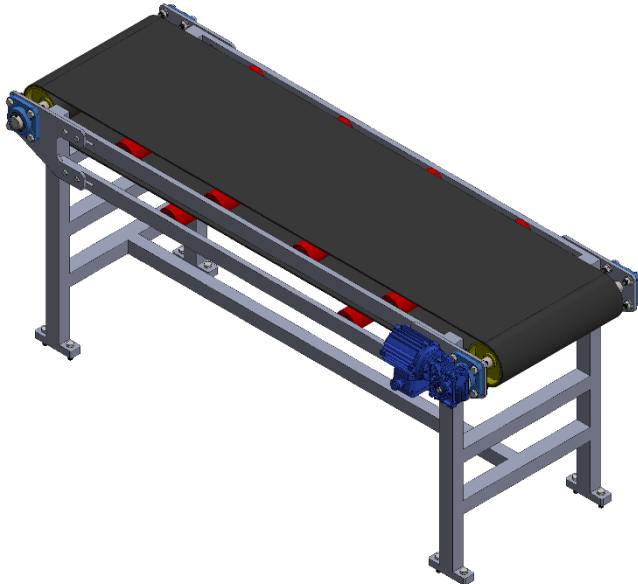
## 1. Giriş

Dökme malzemelerin taşınmasında kullanılan bantlı konveyörler tasarımlarının kolay olması, dayanıklı ve ekonomik olmaları nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir bantlı konveyörde, Ayrık Elemanlar Metodu (Discrete Element Method) (DEM) ile konveyör kapasitesi numerik olarak bulunabilmektedir. Literatürde ilk olarak Cundall tarafından yapılan çalışmada dökme malzemeli sistemlerde her bir tanenin birbiri ve çevresi ile olan etkileşimi hesaplanarak, bütün bir yığılma malzemenin hareketinin simülasyonunu gerçekleştirilmiştir [1]. DEM yöntemini esas alan diğer çalışmalarda; yığılma malzemenin davranışı, akış parametreleri, bant sehimi gibi özellikleri hesaba katılarak elde edilen simülasyon sonuçları, deneysel sonuçlar ile kıyaslanmış ve DEM sonuçlarının deneysel sonuçlarla bağdaştığı ifade edilmiştir. [2-8]

Konveyörlerde eğimli konveyör kapasitesini bulmak için eğim faktörü (k) kullanılmaktadır. Teorik ve endüstriyel hesaplamalarda kullanılan bu eğim faktörü değerleri tasarıma özel olmayıp, genel bir k değeri tablosu üzerinden seçilmektedir ve literatürde bu konuyla ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. İletilen malzeme kapasitesinin net olarak hesaplanabilmesi için her bir eğimli konveyör tasarımında eğim faktörünün tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada DEM analizi kullanılarak tasarımı şekil 1’de gösterilen bir bantlı konveyör için farklı açılardaki eğim faktörü, ayrı ayrı bulunmuştur. Ayrıca konveyörlerin kapasiteleri de teorik olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Konveyörün tasarımı

## 2. Teorik Konveyör Kapasitesi

Kapasite, birim zamana bağlı olarak taşınan malzeme miktarını ifade etmektedir. Bantlı konveyörlerde en önemli tasarım parametrelerinden biri konveyör kapasitesidir ve konveyör eğimine bağlı olarak değişmektedir. Bunun nedeni; yerçekiminin malzemeleri iletim yönüne ters olacak şekilde etkileyerek geri kaydırmasıdır. Konveyör eğimi arttıkça dökme malzemenin geri kaymasını arttırmakta, buna bağlı olarak da iletilen malzemenin kapasitesi değişmektedir. [9]

Bir bantlı konveyörün kapasitesi teorik olarak hesaplanabilmesi; bant üzerine gelen malzeme miktarının hesaplanması ile bulunabilmektedir. Konveyörün kapasitesinin bulunmasında kullanılan 1 numaralı eşitlikte; B, bant genişliği,  $\gamma$ , yığılma malzemenin yoğunluğu ve  $\phi$ , bu malzemenin yığılma açısıdır.

$$Q_{(düz)} = B^2 \cdot 576 \cdot \gamma \cdot v \cdot \tan(0,35 \cdot \phi) \quad (1)$$

$$Q_{(eğimli)} = k \cdot Q \quad (2)$$

Bant üzerinde bulunan malzeme miktarı hesaplandıktan sonra, eşitlik 2’deki gibi bir eğim faktörü (k) ile çarpılarak konveyör kapasitesi hesaplanmaktadır. Bunun için konveyörlerde yaygın olarak kullanılan eğim faktörü (k) değerleri kullanılmaktadır. Teorik konveyör kapasitesi hesabında kullanılacak eğim faktörü değerleri tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Teorik eğim faktörü

Konveyör Açısı	Eğim Faktörü (K)
0°	1,00
5°	0,98
10°	0,95
15°	0,90
20°	0,81

## 3. Ayrık Elemanlar Metodu (DEM) Modeli

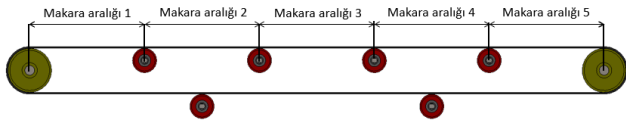
Cundall tarafından ortaya atılan ayrık elemanlar metodu (Discrete Elements Method) (DEM), tanecikli malzemenin bulunduğu sistemlerde, her bir tanenin birbirleriyle ve çevresiyle olan etkileşimlerini değerlendirerek gerçeğe yakın malzeme davranışının saptandığı bir nümerik model yaklaşımıdır [2]. Yöntem, yığılma malzemeli bir sistemin simülasyonunu gerçeğe oldukça yakın bir şekilde yapmakta ve sanal bir deney düzeneği gibi çalışarak, yığılma malzemeli sistemlerin davranışlarının incelenmesini mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada, DEM simülasyonu için Altair EDEM™ yazılımı kullanılmıştır. DEM modelleri her bir konveyör eğimi için ayrı ayrı oluşturulmuştur. DEM modelinin oluşturulmasında öncelikle bant geometrisinin tanımlanması ile başlanılmıştır. Burada bantın dayanım özellikleri; Poisson oranı 0,49, yoğunluğu  $1400 \text{ kg/m}^3$  ve rijitlik modülü  $1,91 \cdot 10^7 \text{ Pa}$  olarak tanımlanmıştır [10]. Ayrıca bant ile kum arasındaki sürtünme değeri tablo 2'deki gibi uygulanmıştır. Banda tanımlanan konveyör hareketi için bant hızı, tüm konveyör eğimleri için  $1 \text{ m/s}$  olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Bant geometrisinin sürtünme özellikleri

Özellik	Değer
Çarpışma İade Katsayısı	0,5
Durağan Sürtünme Katsayısı	0,45
Yuvarlanma Sürtünme Katsayısı	0,15

Tasarımı önceden belirlenmiş konveyörün üst kısmında şekil 2'deki gibi iki tambur, dört makara ve bunu karşılayacak beş adet makara aralığı bulunmaktadır. Simülasyona dahil edilen geometri, şekil 3'teki gibi yalnızca üst makaraların taşıdığı üst bant yüzeyi olacaktır.



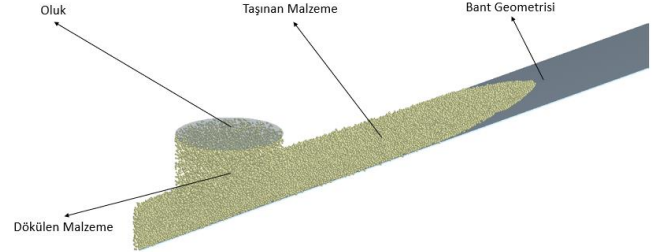
**Şekil 2.** Konveyör tasarımında bulunan makara aralıkları

Altair EDEM yazılımında giriş oluğu, konveyörden bağımsız bir şekilde oluşturulmakta, konumu ve büyüklüğü arzu edilen şekilde belirlenebilmektedir. Tüm konveyörler için oluşturulan DEM modellerinde, aynı büyüklükte ancak eğime bağlı olarak konumu değişecek şekilde oluklar oluşturulmuştur. Her bir konveyör için malzeme girişi  $7,85 \text{ kg/s}$  olarak tanımlanmıştır. Bu değer teorik hesaplama sırasında eşitlik 1 kullanılarak ton/saat olarak bulunmuştur. Farklı eğimlerdeki konveyörler için de aynı giriş debisi uygulanmasına rağmen, konveyörlerin çalışma debisi eğimleri nedeniyle farklılık göstermektedir. DEM analizinde eğim faktörüne ihtiyaç duyulmadan eğimli konveyörün çalışma kapasitesi tasarıma bağlı olarak bulunabilmektedir.

Konveyörlerde yığma malzeme olarak kum taşınmıştır. Oluşturulan DEM modellerinde kum tanelerinin yarıçapı ve birbirleri arasındaki sürtünme katsayısının, DEM modellerinde tanımlanan yığma malzeme özellikleri ve sürtünme katsayısı değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Simülasyon boyunca konveyörlere dökülecek toplam kum miktarı  $15 \text{ kg}$  olarak belirlenmiştir.

**Tablo 3.** DEM modeli için tanımlanan yığma malzeme özellikleri

Özellik	Değer
Parça Yarıçapı(m)	0,003
Poisson Oranı	0,3
Yoğunluk( $\text{kg/m}^3$ )	1400
Rijitlik Modülü (Pa)	$7,692 \cdot 10^6$

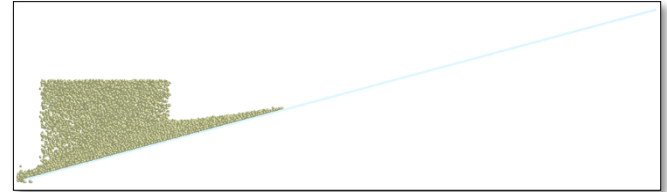


**Şekil 3.** Oluşturulan DEM modeli

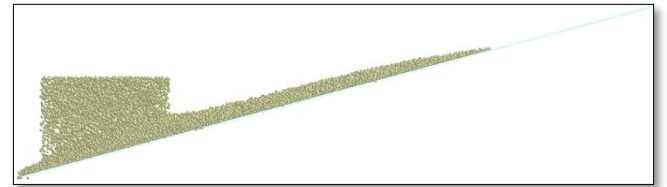
DEM simülasyonu süresi  $20^\circ$  eğimli konveyör için 4,5 saniye, diğer tüm konveyörler için 4 saniyedir. Toplam simülasyon süresi, oluktan malzemenin dökülmeye başlaması ile taşınan son malzeme tanesinin sistemden ayrılması arasında geçen süredir. Bu süre malzeme girişi debisine ve oluktan dökülen toplam malzeme miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 4'te  $15^\circ$  eğimli konveyörün DEM simülasyonunun belirli saniyelerdeki görüntüsü gösterilmektedir, bu bölümde açıklandığı şekliyle DEM modeli tüm konveyör eğimleri için uygulanmış ve simülasyon verileri elde edilmiştir.

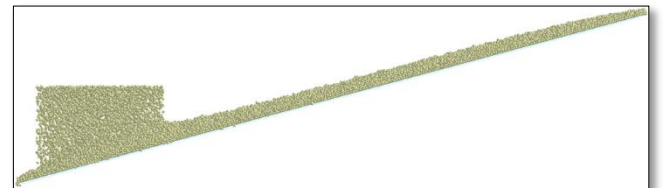
T=0,50s



T=1,00s



T=1,50s

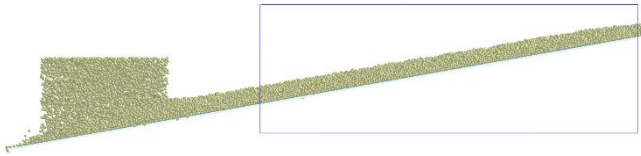


**Şekil 4.**  $15^\circ$  eğimli konveyörün DEM analizi görüntüsü.

#### 4. DEM Sonuçlarının ve Konveyöre Özel Eğim Faktörünün İrdelenmesi

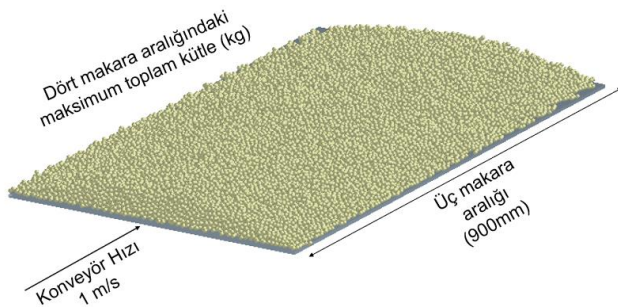
Simülasyon boyunca yığılma malzemenin davranışı saniyeye bağlı olarak incelenmiştir. İncelenen zaman dilimi için yığılma malzemenin sonuçları grafik olarak alınmıştır. Elde edilen grafikler her bir zaman adımına karşılık gelen anlık veriyi, veri-zaman grafiği olarak sunmaktadır. Bu yönüyle DEM analizi sonucu elde edilen çıktıları, gerçek bir deneysel çalışmanın sonuçlarına benzemektedir.

Bu çalışmada DEM simülasyonundan elde edilmesi amaçlanan sonuç, konveyörün tam kapasitesinin tespitidir. Kapasitenin bulunması için kütle verisinin tam bilinmesi gerekmektedir. Birinci ve ikinci makara aralıkları Şekil 5'te görüldüğü üzere oluktan dökülen malzeme ile ilk temas halindedir. Buradaki kütle miktarı oluğa bağlı olduğundan, bu makara aralıkları dikkate alınmayacaktır. Üçüncü, dördüncü ve beşinci makara aralıkları elde edilmesi amaçlanan kütle verisini sunmaktadır. Dolayısıyla konveyör üzerinde bulunan malzeme miktarı için, Şekil 5'teki gibi, son üç makara aralığındaki kütle miktarı incelenmiştir. Konveyörün üç makara aralığının toplam uzunluğu Şekil 6'da gösterildiği gibi 900mm'dir, burada bulunan toplam kütle ve konveyör hızı verileri ile eşitlik 3 kullanılarak konveyör kapasitesi bulunabilmektedir.



Şekil 5. konveyörün yalnızca son üç makara aralığının incelenmesi

Her bir konveyör eğimi için uygulanan DEM simülasyonu sonucu, farklı eğimlerdeki konveyörlerin kapasitelerinin bulunması mümkün olmuştur. Eğimli konveyörlerin kapasiteleri bant-kum ve kum-kum etkileşimlerinin bir sonucu olarak, eğim faktörüne ihtiyaç duyulmaksızın elde edilebilmiştir. Burada bulunan eğimli konveyör kapasiteleri ve düz konveyör kapasitesi değerleri kullanılarak, konveyör tasarımına özel eğim faktörü eşitlik 4 kullanılarak bulunabilmektedir.



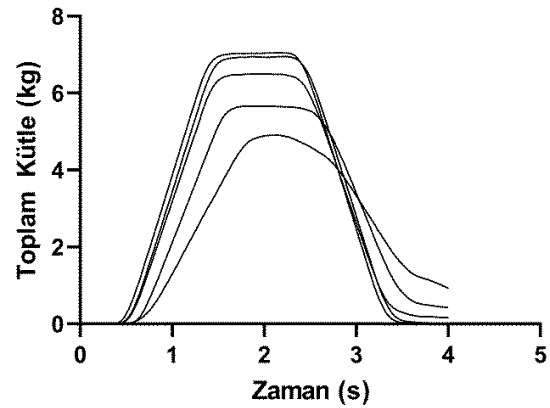
Şekil 6. Konveyörün son üç Makara aralığındaki kütle

$$Kapasite \left( \frac{kg}{s} \right) = \frac{Kütle (kg)}{Uzunluk (m)} \cdot Hız \left( \frac{m}{s} \right) \quad (3)$$

$$indirgeme \text{ faktörü } (k) = \frac{Eğimli \text{ konveyör debisi}}{Düz \text{ konveyör debisi}} \quad (4)$$

#### 5. Tartışma ve Sonuçlar

Çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş olup Şekil 7'de her bir konveyör eğimindeki son üç makara aralığında zamana bağlı olarak bulunan toplam kütle miktarı gösterilmektedir. Şekilde görüleceği üzere, konveyör eğimi arttıkça bantta bulunan toplam kütle miktarı sürekli azalmaktadır. Burada en yüksek kütle için 0° eğimli konveyörde 7,065kg ve en düşük değer için 20° eğimli konveyörde 5,003kg olduğu görülmektedir. Teorik hesaplamalar ve DEM analizi sonucu elde edilen konveyör kapasiteleri karşılaştırmalı olacak şekilde tablo 4'te gösterilmiştir. Burada görüleceği üzere numerik olarak elde edilen kapasite değerleri teorik olarak bulunan kapasite değerlerinden daha düşük olmuştur.



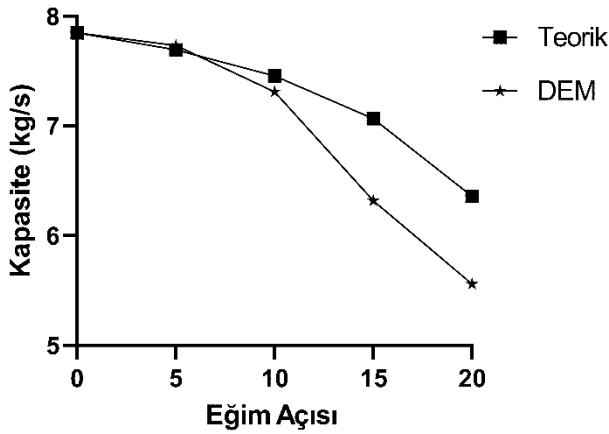
Şekil 7. yukarıdan aşağı doğru sırasıyla 0°, 5°, 10°, 15° ve 20° eğimli konveyörün son üç makara aralığındaki kütle

DEM sonucu elde edilen en yüksek eğim faktörü, düz konveyörde ve 1,000 olarak, en düşük eğim faktörü ise 20° eğimli konveyörde ve 0,705 olarak bulunmuştur. Şekil 8'de görüleceği üzere, teorik olarak bulunan konveyör kapasiteleri, özellikle yüksek eğimlerde DEM sonuçlarından oldukça farklıdır.

İki yöntem incelendiğinde teorik eğim faktörü, konveyörlerde teorik kapasite hesabında genel olarak kullanılan bir katsayıdır. Dolayısıyla bazı konveyörlerde teorik olarak bulunan değerlerin gerçek değerden farklı olması beklenen bir sonuçtur. Buna karşın DEM sonucu elde edilen konveyör kapasitesi, kum-kum ve kum-bant arasındaki sürtünmeye ve konveyörün çalışma şartlarına bağlıdır. Dolayısıyla eğimli konveyörlerde malzeme geri kayması simülasyon sırasında sürtünmeye bağlı olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla DEM sonucu elde edilen kapasitelerin ve buna bağlı olarak bulunan eğim faktörünün, bu konveyörün gerçek eğim faktörü olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 4.** DEM sonucu elde edilen konveyör kapasiteleri ve eğim faktörlerinin teorik sonuçlarla kıyaslanması

Konveyör Eğimi	3-4-5 Toplam Kütle	Bant kısmı uzunluğu	DEM Kapasite (Kütle/Bant kısmı uzunluğu)	Teorik Kapasite	K DEM	K Teorik
0°	7,065	0,900	7,850	7,850	1,000	1,000
5°	6,960	0,900	7,733	7,693	0,985	0,980
10°	6,580	0,900	7,311	7,457	0,931	0,950
15°	5,687	0,900	6,319	7,065	0,805	0,900
20°	5,003	0,900	5,559	6,358	0,705	0,810

**Şekil 8.** Teorik olarak ve DEM analizi sonucu bulunan konveyör kapasitelerinin karşılaştırılması

## 6. Sonuç

Bu çalışmada aynı tasarıma sahip farklı eğimli konveyörlerin kapasiteleri ve kapasitenin hesabında kullanılan eğim faktörü (k) incelenmiştir. Teorik olarak hesaplanan konveyör kapasitesi ve burada kullanılan eğim faktörü (k), DEM sonucu elde edilen konveyör kapasiteleri ve bulunan eğim faktörü (k) değeri ile kıyaslanmıştır.

- Hem nümerik hem de teorik olarak her iki yöntemde de konveyör eğimi arttıkça kapasitenin azaldığı gözlemlenmiş, bu azalmanın DEM’de teorik sonuçlara kıyasla daha büyük oranda olduğu görülmüştür.
- DEM sonucu elde edilen eğim faktörünün, teorik olarak kullanılan eğim faktöründen daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın konveyör eğimi arttıkça daha da arttığı görülmüş olup bantlı konveyör tasarımına etkisi olarak, teorik kapasitenin daha yüksek hesaplanmasına neden olmaktadır.
- DEM’de elde edilen kütle grafiklerinden; konveyör eğimi arttıkça, malzemenin geri kaymasının arttığı tespit edilmiştir.
- Oluk konumu konveyörlerde farklılık gösterdiğinden, oluktan dökülen malzemenin temas ettiği makara aralıklarının kapsam dışında bırakılması doğru sonuçların elde edilebilmesi için gereklidir.

## Teşekkürler:

Bu çalışmada; Altair Engineering Inc. & ST firmasının Altair EDEM yazılımı kullanılmış olup, yazarlar destekleri için firmaya ve çalışanlarına teşekkürlerini sunmaktadırlar.

## Kaynaklar

- [1] Cundall, P. A., Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* (1979). <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- [2] Ilic, D., Wheeler, C. A.: Transverse bulk solid behaviour during discharge from troughed belt conveyors, *Advanced Powder Technology* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.06.024>.
- [3] Rozbroj, J., Nečas, J., Gelnar, D., Hlosta, J., Zegzulka, J.: Validation of movement over a belt conveyor drum. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11, 118-124. (2017)
- [4] Rossow, J., Coetzee, C.J.: Discrete element modelling of a chevron patterned conveyor belt and a transfer chute, *Powder Technology* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.012>.
- [5] Hastie, D.B., Wypych, P.W.: Experimental validation of particle flow through conveyor transfer hoods via continuum and discrete element methods, *Mechanics of Materials* (2010), <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.11.007>.
- [6] Pezo, M., Pezo, L., Jovanović, A. P., Terzić, A., Andrić, L., Lončar, B., Kojić, P.: Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors, *Powder Technology* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.009>.
- [7] Owen P.J., Cleary P.W.: Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM), *Powder Technology*, Volume 193, Issue 3, Pages 274-288, ISSN 0032-5910, (2019) <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.012>.
- [8] Govender, N., Cleary, P. W., Wilke, D.N., Khinast, J.: The influence of faceted particle shapes on material dynamics in screw conveying, *Chemical Engineering*



Science (2021),  
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116654>.

[9] Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA): Belt Conveyors For Bulk Materials, 5th edition, (2002)

[10] Shen, J., Wheeler C., O'Shea, J., Ilic, D.: Investigation of the dynamic deflection of conveyor belts via experimental and modelling methods, Measurement (2018),  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.091>.



# One pier with two stones: A case study on different stones used in the foundation of a Roman bridge on the Batman Stream, Turkey

Felat DURSUN<sup>1,2\*</sup>, F. Meral HALİFEOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, London, UK

<sup>2</sup> Dicle University, Department of Mining Engineering, Diyarbakır, Turkey, 21280, felatdursun@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-8760-3984

<sup>3</sup> Dicle University, Department of Architecture, Diyarbakır, Turkey, 21280, mfhalife@gmail.com, Orcid No: 0000-0003-2032-377

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 24 October 2022

Received in revised form 14 November 2022

Accepted 22 November 2022

Available online 31 December 2022

### Keywords:

Bridge, Perpira, Physical and mechanical properties, Roman, Stone

Doi: 10.24012/dumf.1194052

\* Corresponding author

## ABSTRACT

Perpira is a registered ancient bridge, probably constructed during the Late Roman/Early Byzantine, to span the banks of the Batman Stream. The foundations and the piers are the surviving remains of this bridge. It is known that the bridge has not been repaired since it was discovered. Therefore, the remaining parts of the structure, especially the cut stone blocks, are original and contain precious information about the construction techniques and material selection of the period in which it was constructed. During the site investigations, it has been found that the stones used in the downstream and upstream sections seem to be different. In order to examine this unique application, samples were collected from the piers' downstream and upstream sections. The samples were then used to evaluate their petrographic, geochemical and engineering properties. At the macro scale, the questioned samples' petrophysical characteristics seem similar. The variations in the physicochemical, petrographic, and mineralogical characteristics of stones used in these sections, however, indicate that they have noticeably different properties. The laboratory results demonstrate that the stone used in the downstream section is dolomite and has a strength of 25.21 MPa and a porosity of 25.38 percent, while the one used in the upstream section is limestone and has a strength of 59.93 MPa and a porosity of 5.80 percent. According to the experiment results, it can be stated that Romans constructed this structure using highly competent engineering knowledge and material optimization. The findings also highlight how even a single piece of artefacts may provide new insights for understanding ancient material application practices.

*The location is not already there before the bridge is.*  
Martin Heidegger

## Introduction

The history of bridge construction reached its peak during the Roman period. Since the Romans achieved a very high degree of engineering skill, we still appreciate and utilize the bridges they built [1]. The Early Roman bridges were built entirely of wood. The oldest bridge of ancient Rome is supposed to be the Pons Sublicius, built spanning the Tiber River in Italy by Ancus Marcius, and constructed of wood in the sixth century BC [2,3]. By the second century, the stone was used to construct bridges [2-5]. O'Connor [5] has catalogued some 330 Roman stone arch bridges and mentioned that many of them are still in operation today. Since they are water-crossing structures and subject to different types of weathering compared to those on terrestrial land, it is crucial to examine the impact of material selection on the performance of the stone bridges that have survived to this day. It is well known that choosing the appropriate material and using it effectively requires a great deal of knowledge and experience. On the other hand, constructing long-lasting structures requires not only choosing materials compatible with the local environment and the function of the building but also the supply of that material. Since the building material

selection of the Romans was chiefly influenced by access to the material, the majority of the bridge was made of locally available stone material. As a result, utilization of locally unavailable material was somewhat limited. However, it is also known that when a variety of local sources are available, contractors have the option to select different stones based on their qualities or appearance [6,7]. The ancient bridges are significant assets of historical-artistic heritage and unique elements of the fluvial landscape. It is known that even the ruins of these structures are visible evidence of ancient construction techniques and material practices. Perpira, as the case of the present study, is an ancient bridge (Figure 1), probably constructed during the Late Roman/Early Byzantine period to span the banks of the Batman Stream [8]. The bridge collapsed due to uncertain reasons, and it is now in ruins. The current condition of the bridge suggests that it has not been repaired since it was discovered. Hence, it can be inferred that the remaining parts of the structure, especially the cut stone blocks, are original. In this respect, the bridge symbolizes tangible evidence and contains precious information on past construction techniques and material selection. Therefore, the bridge is unique and worth examining. It is also known that understanding the material properties and structural behavior is vital for any project related to the conservation of architectural heritage.

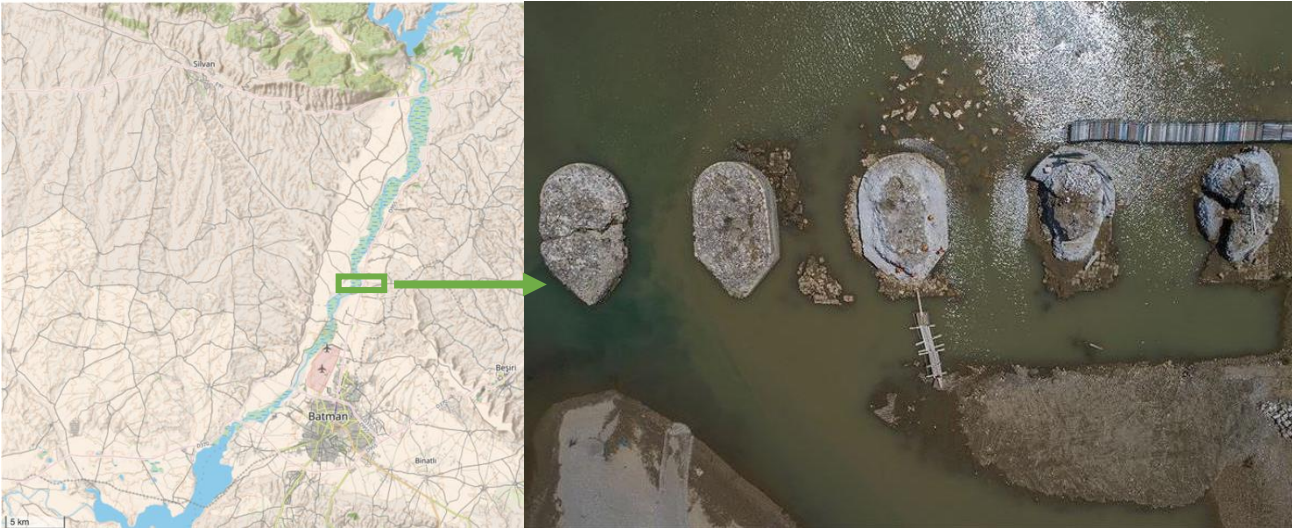


Figure 1. Location and an aerial view of the ruins of the Perpira Bridge

Therefore, this paper aims to evaluate and characterise the materials used in the construction of the Perpira Bridge, which could be crucial for conservation and restoration activities.

*A preliminary form of this study has been previously published at the MERSEM-2021 Conference [9].*

### Historical Background and the State of Conservation

Geographically, Perpira Bridge is located in the province of Batman city in southeastern Turkey (Figure 2). There are some ancient settlements on the right and left banks of

the river/stream, close to the borders of the bridge, including Mound Grê Migro and Pileka (Figure 2).

Although some archaeological surveys were conducted on these ancient settlements and their vicinities [8,10-13], no study is available in the literature related to the bridge's history. In some of these studies, the bridge has been barely mentioned as a "ruined Roman/Byzantine bridge" [8] and as "Harap bridge" [11]. On the other hand, these studies did not specify the period when the bridge was constructed, the function of its construction, or its relationship with the nearby settlements. The bridge is a registered structure, yet since its discovery, it has not been the subject of any conservation projects.

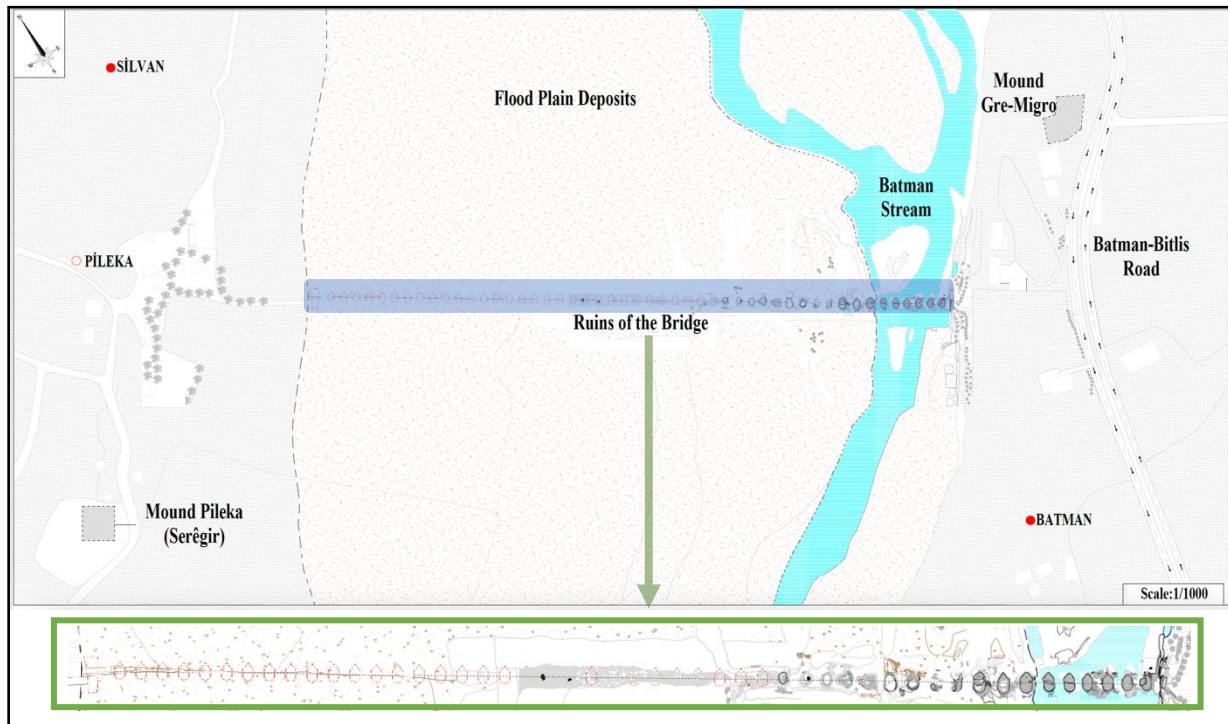


Figure 2. The location (up) and the plan view of the ruins (down) of the Perpira Bridge (the dashed red lines indicate the possible piers covered with debris)

Conservation campaigns have been undertaken to restore and understand the bridge's original structural conditions following years of neglect. The bridge was discovered in a collapsed state. It is currently in ruins for uncertain reasons. Additionally, the way and period of the destruction are not mentioned in any historical or archaeological records.

The only remaining parts of this bridge are the foundation piers, together with some flooring connecting the piers. Ten piers/foundations and an approach wall were initially visible. However, by the end of this year of 2022, eight additional piers (covered by the river sediments) were unearthed (Figure 3). Additional piers will likely be unearthed shortly, considering the flood plain and the bridge's connection to the right bank of the river (Figure 2,3).

The superstructure of the bridge is no longer visible due to its collapse. On the south side of the bridge, some displaced ashlar stone blocks were found in different places along the riverbed. These blocks differ in size and shape from those used for piers, foundations and flooring. These findings suggest that the bridge's superstructure was probably made of stone.

## Material and Methods

Several site investigations were carried out to assess the state of conservation and understand the materials used for the construction. The bridge was constructed by employing stone material. It is clear from the bridge's ruins that the

constructed piers were faced with *opus quadratum*. In order to fill the cores, *opus caementicium* (a roman concrete composed of large aggregates) was used (Figure 4). The stones utilized in the downstream and the upstream (cutwater) sections of the piers have different colours and textures, which were observed during the site investigations (Figure 4). Thus, much attention was given to the stones used in these sections. To investigate, samples were collected from the two sections of the P9 foundation/pier (Figures 3, 5). Samples were collected from both the downstream and the upstream sections of the bridge's ruins to assess the mineralogical, petrographic, geochemical, and index properties of the material (The downstream section sample and upstream section sample will henceforth both be abbreviated as DS and US, respectively). Two thin sections were prepared from the DS and US for examination under an optical microscope in order to evaluate their mineralogical and petrographic characteristics.

To examine the chemical compositions of the collected samples, the X-Ray fluorescence (XRF) method was used. Finally, 28 samples with 5-centimetre edge lengths (14 from each section) were prepared to examine physicomaterial properties (Figure 5). During the laboratory studies, the engineering properties of the samples, including the effective porosity, unit weight, water absorption, sonic velocity and uniaxial compressive strength (UCS), were measured. The samples' engineering properties were determined per the suggestions and recommendations of ISRM [14] and RILEM [15]

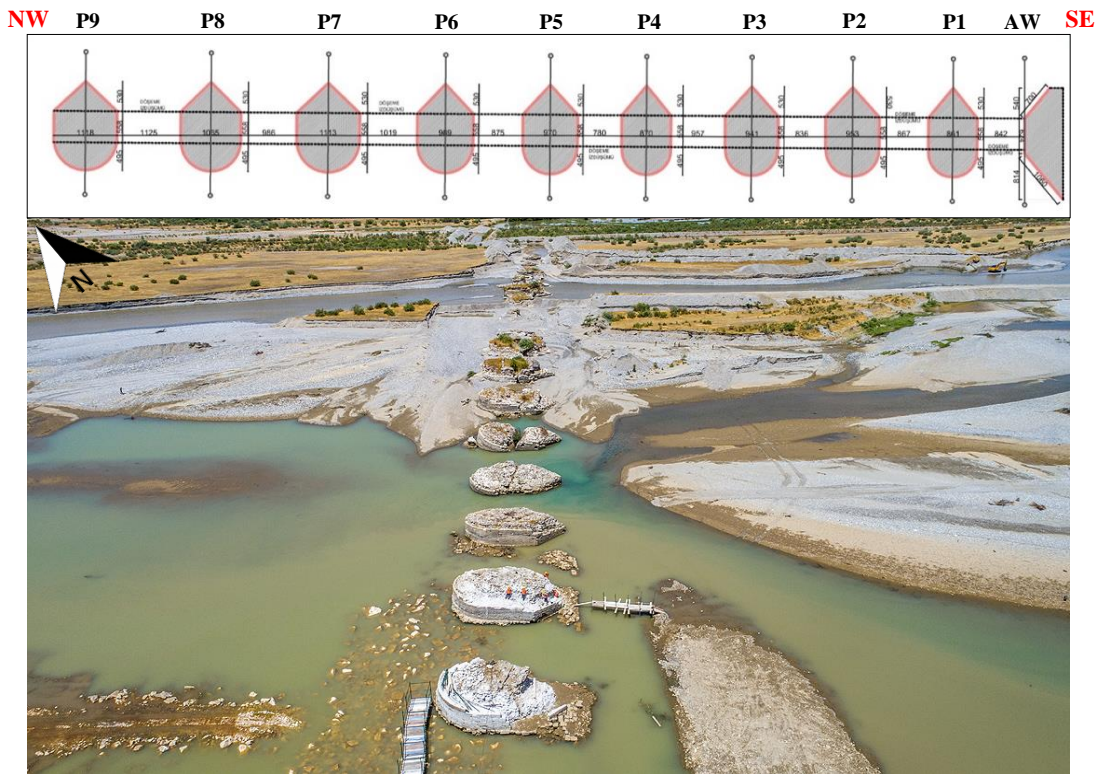


Figure 3. A drawing indicating the dimensions of the approach wall (AW) and some of the piers (P) (up); an aerial view of the ruins of the Bridge and Batman Stream (down)

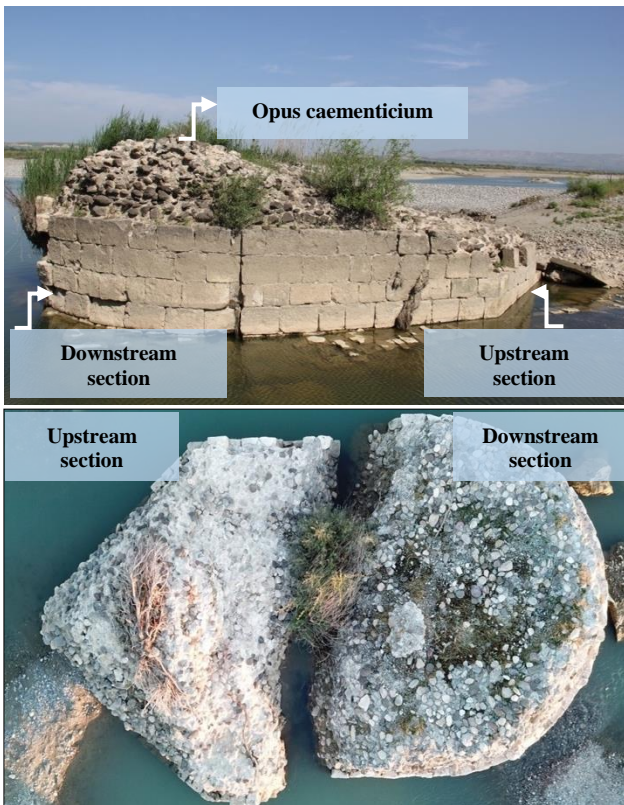


Figure 4. Different views from the piers/foundations



Figure 5. Samples used in the experimental studies

## Results and Discussions

### Petrographic and Geochemical Characteristics

Different petrographic parameters, including mineral content, grain size, and texture, have an impact on the mechanical behaviour and durability of the rock material. Therefore, a petrographic description of rocks for engineering purposes is essential for determining the

parameters that cannot be identified through a macroscopic examination [14]. During the investigation, much attention was devoted to the matrix, organic material content and packing of the samples collected from different sections of the same foundation/pier.

Petrographic investigations on the DS indicate that the matrix is dominated by carbonate minerals (predominantly dolomite and less calcite). Mosaic texture, in which dolomite crystals are tightly packed and in contact with each other by regular grain boundaries, is the typical characteristic of the examined sample (Figure 6-a). The US, on the other hand, is dominated by calcite minerals and exhibits clastic texture. The calcite minerals are composed of micro/cryptocrystalline calcite, whose texture is called micrite. Micrite is occasionally observed at the boundaries of the fossils. The sample is an example of reefal limestone with dense red algae. The unit also contains fragments of red algae and benthic foraminifers. Black and white calcite minerals, as well as micrite, serve as the binder. It is probably the Early Miocene in age (Figure 6-b).

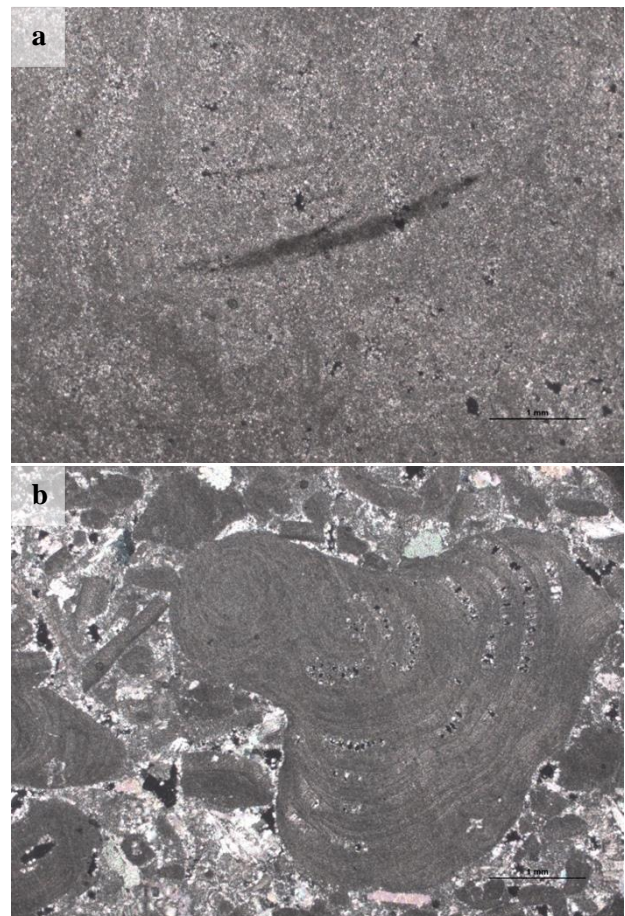


Figure 6. Photomicrographs of the samples collected from downstream (a) and upstream (b) sections of the bridge

The major oxides of the selected samples are tabulated in Table 1. The XRF results reveal that CaO is the most abundant component. The DS contains CaO and MgO as the major constituents. The remaining oxides are represented in low concentrations (less than one percent). It is understood from the overall evaluation of the major

oxides that the questioned sample has a  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{MgO}$  composition of 78.73% and of 19.7%, respectively. The US, on the other hand, contains  $\text{CaO}$  as the major constituent. The remaining oxides are present in minor concentrations (less than one percent). It is understood that  $\text{CaCO}_3$  forms more than 98 % of the US.

Based on the chemical composition and petrographic descriptions, modal analysis, a method suggested by ISRM [14], was used to estimate the mineral composition of the questioned samples. The results of the modal analyses indicate that DS has a mineralogical composition of 9.2 % calcite and 90.8 dolomite, while US has 98.2 calcite and 1.84 % dolomite. The abundance of the  $\text{MgO}$  in the DS supports the petrographic investigations that the stone employed in this section of the bridge is dolomite. On the other hand, the abundance of the  $\text{CaO}$  proves that the stone used in the upstream section of the bridge is limestone. Since the investigated US consists of macrofossils, it is described as fossiliferous limestone.

### Physical and Mechanical Properties

Once it was determined that different stone materials were used in the downstream and upstream sections of the bridge's foundation, a new question arose within the scope of this study. What are the engineering performances of these materials? The physicomaterial properties mainly affect the engineering performance of the stone material. In an attempt to evaluate the durability of the stone material, it is crucial to test its index properties. In reference to the experimental studies conducted within the scope of the present study, a summary of the results for the questioned samples is tabulated in Table 2. Effective porosity and unit weight are two essential index properties of rock that can affect its durability. The structure of a rock material becomes weaker and more deformable when pores are present [14]. Unit weight, which correlates strongly with porosity, strength, and mineral composition, can also be used to assess the physical properties of rock material [16]. The same test can be used to determine those index properties. The effective porosity and dry and saturated unit weights of the questioned samples were determined using the saturation and buoyancy methods suggested by ISRM [14].

Based on measurements of 28 samples from the different sections of the bridge foundation, the DS have effective

porosities varying from 24.04% to 27.63%, with an average of 25.3%. The DS's dry and saturated unit weights are measured as 19.27-20.46  $\text{kN/m}^3$  (with an average of 20.03  $\text{kN/m}^3$ ) and 21.98-22.82  $\text{kN/m}^3$  (with an average of 22.52  $\text{kN/m}^3$ ), respectively. On the other hand, the US has effective porosities ranging between 2.65% to 10.97%, with an average of 5.80%. Here it is worth mentioning that the majority of the effective porosity values for this section are less than 7%. The US's measured dry and saturated unit weights are between 17.66-25.55  $\text{kN/m}^3$  (with an average of 24.04  $\text{kN/m}^3$ ) and 18.25-25.81  $\text{kN/m}^3$  (with an average of 24.61  $\text{kN/m}^3$ ), respectively. According to Anon [16], the DS have high porosity (25.3%) and a low unit weight (20.03  $\text{kN/m}^3$ ), whereas the US have a medium porosity (5.80%) and moderate unit weight (24.04  $\text{kN/m}^3$ ).

Water absorption is an important parameter that affects the durability of rock material. It is the difference between the weight of a sample when it is dry and when it is completely submerged in water. This test was performed to measure the amount of water that rock can absorb under a certain pressure in a vacuum vessel, and the results are expressed as percentages. The test was conducted using the procedures suggested by RILEM [15]. During the test, water absorptions by weight and volume were determined for the samples collected from the downstream and upstream sections of the bridge. The water absorptions by weight and by volume of the DS lie between 11.53%-14.07% and 17.34%-20.72%, respectively. The average water absorption by weight and volume values for this sample group are 12.44% and 19.12%, respectively. The water absorption by weight and volume of the US are in the range of 1.02% to 4.65% and 1.96% to 8.73%, respectively. The average water absorption by weight and volume results for this sample group are measured as 2.42% and 4.98%, respectively.

As a non-destructive test method, Sonic velocity is a parameter used to evaluate rock materials in terms of their elasticity, anisotropy, degree of fissuring, porosity and state of deterioration. Moreover, this test can monitor rock material's degradation mechanisms under such different cyclic loads as wetting and drying, freezing and thawing, and salt crystallization. The sonic velocity measurements of the samples collected from the different sections of the bridge were carried out according to the recommendations of ISRM [14].

Table 1. Chemical composition (wt%) of the samples (downstream and upstream sections) determined by XRF

Oxides										
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{MnO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	LoI
Downstream Section Sample										
0.2	31.8	0.1	<0.1	19.7	<0.1	0.2	<0.1	0.6	<0.1	46.95
Upstream Section Sample										
0.2	54.7	0.1	<0.1	0.4	<0.1	0.1	0.1	0.4	<0.1	43.70

Based on the measurements, the dry sonic velocity of the DS ranges from 2625.39 to 3182.42 m/sec., with an average of 2914.82 m/s. In contrast, the saturated sonic velocity of this sample group is between 2356.40 and 2946.55 m/s, with an average of 2691 m/s. Sonic velocity measurements of the US for the dry condition range from 4302.5 to 5060.4 m/s, with an average of 4743.61 m/s, ranging from 4454.87 and 5202 m/s, with an average of 4877.55 m/s for saturated condition. Based on the rock classification for the sonic velocity of the rock materials proposed by Anon [16], the DS is classified as having "low" sonic velocity for both dry and saturated states. On the other hand, the same classification groups the US in the "high" sonic velocity category. Compressive strength is another important parameter to characterize the material. The average UCS values of the samples collected from the downstream and the upstream sections were measured as 25.21 and 59.93 MPa, respectively. It is inferred from the experimental results that the UCS of the DS was approximately 60 percent lower than the US. According to the rock classification for the strength of rocks proposed by Anon [16] and BSI [17], the downstream and the upstream section samples are classified as "moderately strong" and "strong", respectively.

Experimental studies show that the physico-mechanical behaviour of these two stones is quite different. According to the results, the porosity of DS is roughly five times higher than that of the US, and this situation corresponds to a similar path in hygric values. It is found that the average water absorption values indicate that the stone employed in the upstream section has an approximately 80 percent lower water absorption than that employed in the downstream section. DS's higher water absorption capacity means it can absorb more water than the US. Since the porosity and fluid content of porous rocks significantly impact their acoustic velocities, rocks with lower porosities exhibit a distinct linear relationship between the porosity and the ultrasonic wave velocities [18]. These two stones exhibit significant variances in dry and saturated sonic wave velocities. The findings suggest that the material's decay can describe the DS's "low" wave velocity.

DS are classified as having a "low" sonic velocity compared to the US. In addition to water content and porosity, it is thought that a weathering-related decrease in the cohesion and elastic coupling between the dolomite calcite crystals also impacts this situation [18]. The compressive strength also verifies the variations of the investigated samples. It can be followed through Table 2 that the compressive strength of the US is more than two times higher than that of the DS.

According to the test results outlined above, the material used in the upstream section is considerably more durable, especially in terms of water absorption, porosity, and mechanical strength, than the material used in the downstream section. Although the stones in both sections seem relatively durable, it was observed that the crack development and the surface abrasions were more evident in the downstream section. The petrographic and physico-mechanical variations between the materials used in different sections of the bridge pier indicate that this choice of material was not decided by chance. Bridges are susceptible hydraulic structures to flow-induced impacts. It is known that the flow regime significantly impacts the upstream section of the bridges and may damage the bridge's elements [19]. Construction of cutwater structures at the upstream section of the bridge piers is a common practice today as a countermeasure for such impacts. Cutwaters can be described as wedge-shaped bridge foundations. The primary objectives of the cutwaters are to (i) prevent the local erosion that might result in scour holes, (ii) reduce the impact of the flow pressure, (iii) control potential damages induced by floods and deflect tree roots and flood debris [20-23].

To construct such a structure, choosing a material with low water absorption and high strength is essential. The results obtained within this study's scope revealed that the stone material selection in the cutwater/upstream section of the Perpira bridge resulted from an engineering experience. In addition, it reflects the optimization; with the limited sources, they effectively employed the locally available material. Without knowledge of the material performance, it cannot be applied to such a unique and critical engineering project of that time.

Table 2. Physico-mechanical properties of the samples (downstream and upstream sections) based on the experimental studies

Properties	Number of Tested Samples	Test Results (Mean±SD <sup>†</sup> )	
		Downstream Section (DS)	Upstream Section (US)
Dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	15/15	20.03±0.30	24.04±1.89
Saturated unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	15/15	22.52±0.22	24.61±1.81
Effective porosity (%)	15/15	25.38±0.89	5.80±2.50
Water absorption by weight (%)	15/15	12.44±0.63	2.42±1.11
Water absorption by volume (%)	15/15	19.12±1.01	4.98±1.96
Dry sonic velocity (m/s)	15/15	2914.82±119.91	4743.61±197.04
Saturated sonic velocity (m/s)	15/15	2691.0±130.68	4877.55±205.47
Uniaxial compressive strength (MPa)	10/10	25.21±9.13	59.93±22.81

†: Standard Deviation

## Conclusions

Perpira is a stone bridge recently was recently discovered in a collapsed state. It is currently in ruins for uncertain reasons. Except for the limited number of archaeological and surface surveys carried out within the study area, written sources about the Perpira bridge are scarce; therefore, the story of its construction remains a mystery. The foundation piers and some flooring connecting the piers are the only remaining parts of this bridge. This study aims to evaluate the lithological and physical characteristics of the stones used in different sections of the remaining parts. The site observations and laboratory studies indicate that the stones used in the bridge's downstream and upstream (cutwater) sections exhibit different petrographic, geochemical and physicochemical properties. Dolomite is the stone employed in the downstream section, and limestone is the stone used to construct the upstream section. The preliminary findings suggest that while the material used in the upstream section is suitable for such structures constantly in contact with water, the material used in the downstream section is not suitable. It is assumed that the lack of local availability of the upstream section stone in the region limited its use in both sections of the bridge pier. Engineers and architects were therefore forced to make decisions regarding the most effective use of resources. Additionally, the results emphasize some critical remarks that even ruined artefacts provide valuable knowledge regarding ancient times' material application practices. Therefore, preserving these structures is necessary for maintaining their stability and understanding historical material use patterns.

Here it is important to note that these findings, obtained within the scope of this study, were based on the examination of samples collected from a single bridge pier. Due to ongoing conservation works, it was unable to collect sufficient samples to confirm whether this unique material application is replicated at other piers. In the near future, the continuation of this situation will be questioned through a systematic sampling from the other piers of the bridge.

## Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by Dicle University, Scientific Research Project Coordination Office (DÜBAP) under grant number MÜHENDISLIK.18.007; and the conservation company for providing the opportunity to conduct this investigation at the site.

## References

[1] J. J. Jensen, "History of Bridges-A philatelic review," in Proceedings of 4th Symposium of Strait Crossings, Bergen, Norway, 2001.  
 [2] C. S. Whitney, *Bridges of the World: Their Design and Construction*, New York: Courier Corporation, 2003.

[3] J. W. Humphrey, J. P. Oleson and A. N. Sherwood, *Greek and Roman Technology: A Sourcebook: Annotated Translations of Greek and Latin Texts and Documents*, Routledge, 2009.  
 [4] C. O'Connor, "Development in Roman stone arch bridges," *Endeavour*, vol. 18, no. 4, pp. 157-162, 1994.  
 [5] C. O'Connor, *Roman Bridges*, Cambridge University Press, 1993.  
 [6] J. P. Adam, *Roman building: materials and techniques*, Routledge, 2005.  
 [7] A. Álvarez and A. Pitarch, "Local stone used on the Roman bridge of Martorell (Barcelona, Spain)," in *Interdisciplinary Studies on Ancient Stone. Proceedings of the IX ASMOSIA Conference*, Tarragona, 2012.  
 [8] G. Algaze, "A new frontier: First results of the Tigris-Euphrates archaeological reconnaissance project," *Journal of Near Eastern Studies*, vol. 48, no. 4, pp. 241-248, 1989.  
 [9] F. Dursun and F. M. Halifeoğlu, "Material Properties of an Ancient Stone Bridge: Perpıra Bridge, Turkey," in *MERSEM-2021, 11th International Marble and Natural Stone Congress and Exhibition of Turkey*, Diyarbakır, 2021.  
 [10] B. J. Parker, "The mechanics of empire: The northern frontier of Assyria as a case study in imperial dynamics," *The Neo-Assyrian Text Corpus Project*, 2001.  
 [11] A. M. Comfort, "Roads on the frontier between Rome and Persia: Euphratesia, Osroene and Mesopotamia from AD 363 to 602," University of Exeter. (Unpublished Ph.D. Thesis), Exeter, 2009.  
 [12] A. Comfort, "Roman bridges of South-East Anatolia," *Collection de l'Institut des Sciences et Techniques de l'Antiquité*, vol. 1277, no. 2, pp. 315-342, 2013.  
 [13] M. Marciak, "Cultural Landscape of Gordyene: Three Regna Minora of Northern Mesopotamia Between East and West," in *Sophene, Gordyene, and Adiabene*, Brill, 2017, pp. 204-240.  
 [14] ISRM, *Rock characterization, testing and monitoring*, International Society for Rock Mechanics Suggested Methods, Oxford: Pergamon Press, 1981.  
 [15] RILEM, "Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods: Commission 25-PEM," *Materials and Structures*, vol. 13, no. 75, p. 175-253, 1980.  
 [16] Anon, "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, Part 1: rock and soil materials," *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, vol. 19, p. 364-371., 1979.  
 [17] BSI, "Code of Practice for Ground Investigations," *British Standard Institution (BS 5930:2015)*, London, 2015.



- [18] S. Siegesmund and H. Dürrast, "Physical and Mechanical Properties of Rocks," in *Stone in Architecture*, Berlin Heidelberg, Springer, 2011, p. 97–225.
- [19] L. B. Hedrick, S. A. Welsh and J. T. Anderson, "Influences of high-flow events on a stream channel altered by construction of a highway bridge: a case study," *Northeastern naturalist*, pp. 375-394, 2009.
- [20] M. H. Strickland, *Roman building materials, construction methods, and architecture: The identity of an empire*: Clemson University, 2010.
- [21] Q. Chun, H. Jin and S. Zhang, "Structural performance and seismic response for Chinese ancient stone arch bridge—a case study of the Putang bridge," in *Brick and Block Masonry-From Historical to Sustainable Masonry*, CRC Press., 2020, pp. 796-800.
- [22] A. Gaspari, "The Roman and Medieval Bridges over the Sava and Klausenstein Tower at Zidani Most," *Varstvo spomenikov*, vol. 45, 2010.
- [23] H. Fouli and I. H. Elsebaie, "Reducing local scour at bridge piers using an upstream subsidiary triangular pillar," *Vols. Arab J Geosci* 9, 598 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2615-3>.



Araştırma Makalesi / Research Article

## Geosentetik Takviyeli Kum Kazıkları ile Güçlendirilen Yumuşak Kil Zeminlerin Düşey Yer Değiştirme Davranışının Değerlendirilmesi

### *Evaluation of Vertical Displacement Behavior of Soft Clay Soils Reinforced with Geosynthetic Reinforced Sand Piles*

Kaveh Dehghanian<sup>1</sup>, Serpil Erden<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [kavehdehghanian@aydin.edu.tr](mailto:kavehdehghanian@aydin.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6372-4984>

<sup>2</sup> İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [serpileerden@gmail.com](mailto:serpileerden@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6796-5363>

#### MAKALE BİLGİLERİ ÖZ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 8 Mart 2022  
Revizyon 17 Ekim 2022  
Kabul 17 Ekim 2022  
Online 31 Aralık 2022

##### Anahtar Kelimeler:

Killi zemin, PLAXIS 2D, SoftSoil Model, Mohr-Coulomb Model, Kum kazık.

Bu çalışma, İstanbul ili Bağcılar ve Zeytinburnu ilçelerinde yapılmış zemin etütleri sonrası geoteknik raporlar sonucunda elde edilen verilerle, yüksek-plastisiteli kil zeminlerdeki düşey yer değiştirmenin azaltılması için kum kazıkların performans değerlendirilmesini içerir. İncelemeler Sonlu elemanlar yöntemi olan PLAXIS-2D ile yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında suya doymuş ve (yeraltı suyunun olmadığı) kuru olan yüksek-plastisiteli killi zeminin (CH) içerisine çeşitli uzunluk/çap oranlarında (L/D), tekil ve grup (üçlü) kazıklar yerleştirilmiştir. Kum kazıklar çeşitli L/D oranlarında (5,71-8,57-10) ve farklı kazıklar arası mesafelerde (S) modellenmiştir. Kazıklar arasındaki ara mesafe ile grup etkisine bakılmıştır (S:2, S:4). Tüm zemin üzerine 578 kN/m<sup>2</sup> düzgün yayılı yük uygulanmıştır. Bu çalışmada yüksek-plastisiteli kil içerikli zemin, Yumuşayan Zemin (Soft Soil) modeli, dolgu kısım için Pekleşen Zemin modeli (Pekleşen Zemin model) ve kum kazıklar ise Mohr-Coulomb zemin modeli ile modellenmiştir. Daha sonra oturmanın en az olduğu durumda kum kazıklar geotekstil donatı ile kaplanarak PLAXIS-2D ile tekrar analiz edilmiştir. Çıkan sonuçlara göre yeraltı su seviyesinin 1m olduğu durumda (doymuş) halde en iyi zemin düşey yer değiştirme L/D oranının 8,57 olduğu ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durumdur. Zemin kuru iken (yeraltı suyunun olmadığı) en iyi düşey yer değiştirme L/D oranı 8,57 olan ve zemin içerisine yerleştirilen tek kazıklı olduğu durumdur.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 8 March 2022  
Received in revised form 17 October 2022  
Accepted 17 October 2022  
Available online 31 December 2022

##### Keywords:

Clay soil, PLAXIS 2D, Soft Soil Model, Mohr-Coulomb Model, Sand Pile.

#### ABSTRACT

This study includes the performance evaluation of sandpiles in order to reduce the vertical displacement in high-plastic clay soils with the data obtained as a result of geotechnical reports after soil surveys in Bağcılar and Zeytinburnu districts of Istanbul. Investigations were made with the finite element method PLAXIS-2D. In this study, single and group (triple) piles with various length/diameter ratios (L/D) were placed in a high-plastic clay soil (CH), which is saturated with water and dry (without groundwater). Sand piles are modeled at various L/D ratios (5.71-8.57-10) and at different pile spacings (S). The spacing between the piles and the group effect were examined (S:2, S:4). A uniformly-distributed load of 578kN/m<sup>2</sup> was applied over the entire floor. In this study, soil with high-plastic clay content was modeled with Soft Soil model, Hardening-Soil model was used for embankment layer, and sand piles were modelled with Mohr-Coulomb model. Then, the sand piles were covered and reinforced by geotextile and analyzed again with PLAXIS-2D when settlement was minimum. According to the results, when the ground water level is 1m (saturated), the best soil vertical displacement occurs as L/D ratio is 8.57 and the spacing between the piles is 4m. When the soil is dry (no groundwater), the best vertical displacement happens as L/D ratio is 8.57 and it is a single pile placed in the soil.

Doi: 10.24012/dumf.1084638

\* Sorumlu Yazar

## I.Giriş

Kil içerikli zeminler düşük mukavemetinden dolayı, aynı zamanda sıkışa bilirliliğinin yüksek olması nedeniyle ile fazla oturma eğilimindedir. Bu durum stabilite problemlerine sebebiyet verir. Killi zemin içerisine yerleştirilen kum kolonlar yumuşak killi zeminlerde oturmaya azaltmak, taşıma kapasitesini arttırmak ve killi zeminin konsolidasyon sürecini hızlandırmak için uygulanan zemin iyileştirme yöntemlerdendir. Bu çalışma, killi zemin içerisine yerleştirilen kum kazıkların yük altındaki oturma davranışını ve zemin içerisine yerleştirilen kum kazıkların davranışını araştırmak amacı ile yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonlu elemanlar analiz yöntemi olan PLAXIS v 8-2D ile modellenerek yapılmıştır.

Literatürde, kil içerikli zemin içerisine kum kazıklar yerleştirip, analizler, deneysel çalışmalar ve analitik yöntemler ile incelemeler yapılan çalışmalar mevcuttur. Killi zemin içerisine yerleştirilen kum kolonları ile yapılan bir çalışmada; geosentetik ile güçlendirilmiş kum kolonlarının yumuşak zeminlerdeki performansının incelenmesini amaçlanmıştır [1]. Diğer bir çalışmada kolonlar, inşaat kalıntısı, taş ve kum olmak üzere farklı şekilde modellenmiştir. Geogrid kolon içerisine yatay olarak yerleştirilmiş ve kolonların dış yüzeyi ise geotekstil ile kaplanmıştır. Kaplamada üç çeşit geotekstil kullanılmıştır. Modelleme için sonlu elemanlar metodu, büyük ölçekli laboratuvar testleri ve sayısal analizler kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda geosentetik ile kaplanan kum kolonlarının, kolonun performansını arttırdığı ve zeminde kaplamanın rolünün büyük önem taşıdığını göstermektedir. Ayrıca inşaat kalıntısı ve taşın, kum kolonlar ile kıyaslandığında daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen verilere göre sayısal analiz sonuçları ve testlerden elde edilen veriler uyum içerisinde. Başka bir çalışmada, yumuşak killi zeminlerde yük taşıma kapasitesini arttırmak için etkili bir teknik olarak granül kazıklar benimsenmiştir. Granül kazıkları incelemek adına çeşitli araştırma makalelerinde yayınlanan, laboratuvar model testlerini, saha çalışmalarını, sayısal analizleri ve analitik yaklaşımları veri sağlamak amacıyla bir araya getirerek sunulmuştur [2].

Yumuşak kil zemin içerisine yerleştirilen tek bir kolonun performansını incelemek adına yumuşak killi zemin içerisine yerleştirilen kum kolon laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel testler, sayısal analiz sonuçları ve analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [3]. Yapılan başka bir çalışma için bir dizi test uygulanmış sonuçlarda ise, geosentetik kaplama sertliğinin, geosentetik kaplamalı bir kum kolonunun şişkinlik mesafesini büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu çalışmada, üç boyutlu ve iki boyutlu analizler yapılmıştır. Üç boyutlu analizler dolgu tabakası altında dikdörtgen şerit modellenerek yapılmıştır. İki boyutlu analizler ise birim hücre modeli ve gerini yaklaşımları ile modellenerek yapılmıştır. Çalışmada granül kolonları modellemek için sertlik modülü 95 kN/m ve 1750 kN/m olan geotekstil malzeme kullanılmıştır. Yeraltı su seviyesi ise dolgu

tabakasının altında bulunmaktadır. Simülasyonlar PLAXIS 3D ve PLAXIS 2D ile gerçekleştirilmiştir. Granül kolonların modellenmesi için Mohr-Coulomb Model kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda birim hücre modelinin dolgu tabakasındaki oturmaya tahmin etmek ve ayrıca gerilmeleri belirlemek için uygun olmadığına karar verilmiştir [4]. Diğer bir çalışmada, yumuşak killi zeminlerde yanal çevreleme basıncından dolayı granül kolonların geosentetik ile kaplanması sonucu oluşan performansın değerlendirilmesini amaçlanmıştır. İncelemeleri aşamasında ABAQUS programı kullanılmıştır. ABAQUS programı kullanılarak geosentetik kaplı kolonları ve kaplamasız kolonları simüle etmek için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Kolonlar Mohr-Coulomb Model, killi zemin Modife Cam Clay, geosentetik ise Linear Elastik Model kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarında kolonları geosentetik ile kaplamanın büyük oranda gerilme ve oturma davranışını iyileştirdiği görülmüştür [5]. Khan vd. (2016) yaptığı çalışmada L/D oranları 4-5,5-7 olan kum kolonlarının yumuşak killi zemin içerisindeki performanslarını ve etkilerini değerlendirmek amacı ile teorik ve deneysel araştırmalar yapmıştır [6]. Zemin içerisine granül ve kireç kolonlar yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düşük kesme dayanımına sahip zeminler için granül kazıkların kireç kazıklara göre dayanımının daha yüksek olduğuna fakat yüksek kesme dayanımına sahip zeminlerde ise kireç kolonların granül kazıklara göre daha fazla dayanım gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. FLAC 3-D yazılımı kullanılarak yapılan yumuşak zeminlerde geosentetik ile kaplamalı ve kaplamasız kum kolonlarının yanal yük taşıma kapasitesinin değerlendirilmesinde 50 mm ve 100 mm çaplarda kolon, üç farklı (tek, üçgen, kare) düzenleme modeli şeklinde tek ve grup etkisini incelemek için modellenmiştir. Sayısal analizler 15, 30, 45, 75 kPa çevre basınçlarında gerçekleştirilen çevre basınçlarında yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre normal basınçtaki artış ile birlikte kesme gerilmesinin de büyüklüğünde artış olduğu görülmektedir [7]. Kaplama malzemesi olarak geosentetik kullanılan yumuşak zeminde geosentetik kaplamalı ve kaplamasız kum kolonlarının yanal yük kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geosentetik kaplamalı ve kaplamasız kum kolonları üzerinde kesme deneyi yapılmıştır. Çalışma 15 kPa ve 75 kPa aralığında farklı basınçlar uygulanarak yapılmıştır. Kolon çapları 100 mm ve 50 mm dir. Üç farklı düzenleme modeli kullanılmıştır. Geosentetik kaplamalı tek kolon, grup etkisinin araştırılması için ise üçgen şeklinde üçlü kolon ve kare şeklinde dört kolon şeklinde modellenerek testler gerçekleştirilmiştir. Kaplama malzemesi olarak geotekstil kullanılmıştır. Deney sonuçlarından sonra kaplamanın etkisinin anlaşılması için kesme mukavemetindeki artış açısından tartışılmıştır. Geotekstil kaplamanın kum kolonlarının yanal yük kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca gesentetik ile kaplı kum kolonları ve kaplamasız kolonlarda görülen kırılmalarda tartışılmıştır [8]. Orekanti ve Dommaraju (2019) çalışmasında yumuşak killi zeminlerin su ile etkileşim halinde iken hacimsel olarak değişmesine karşı çözüm olarak granül kazıkların kullanılmasının uygun olduğunu fakat killi zeminler içerisinde granül kolonların şişme eğiliminden dolayı geosentetik ile kaplanması gerektiğini söylemiştir [9]. Bu çalışmada geotekstil kaplama ve yanal donatı kombinasyonu varlığında granül kazıkların

basma testleri altındaki tepkisi araştırılmıştır. Test sonuçlarına göre geotekstil ile kaplanmış kazıkların yük taşıma kapasitesinin, geotekstil ile kaplanmamış duruma göre 2,44 kat kadar artış olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki başka bir çalışmada da yumuşak killi zemine yerleştirilen granüler kolonların yük- oturma davranışı ve şişkinlik özelliklerini deneysel çalışma sonucunda araştırmaktır. Granüler kolonlar farklı boyutlarda beş çeşit agrega kullanılarak modellenmiştir. Yapılan test sonuçlarına göre agrega boyutları küçüldükçe yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Agrega boyutlarına göre ve sıkıştırılmış veya gevşek olma durumlarına bağlı olarak nihai yük taşıma kapasitesindeki artış %106 ile %210 arasında değiştiği görülmüştür. Çalışmasında bir dizi test uygulayarak yük taşıma kapasitesinde artış olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur [10]. Aynı şekilde yumuşak zeminleri güçlendirmek amacı ile kullanılan kum kazıklarının, zemin içerisinde etkilerine araştırmak için yapılan başka bir çalışmada da küçük ölçekli laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar testleri D: 37 mm çaplı kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kum kolonlar ile güçlendirilmiş zeminin özellikleri, takviyesiz zemin ile karşılaştırılmış olup ve kazıklar arasındaki mesafe değiştirilerek grup etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak kum kolonlarının killi zeminde, zemini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kazıklar arası ara mesafenin artması halinde grup verimliliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. S/D oranı 2'nin, S/D oranı 3'e göre yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğu görülmüştür [11]. Bu çalışmanın amacı, düşük mukavemete sahip, yüksek sıkışabilirlik özelliği olan ve şişme sorunları görülen yumuşak killi zeminlerde oturmayı azaltmak ve zemini iyileştirmek (güçlendirmek) adına uygulanan geosentetik takviyeli kum kazıklarının (kolon) performansının değerlendirilmesidir. Bu çalışmanın sürdürülebilirliği açısından zemin içerisine çeşitli uzunluk/çap oranlarına sahip geosentetik donatı ile güçlendirilen kum kazıkları takviye edilmiş, farklı yükler altındaki, oturma (düşey yer değiştirme) performansları incelenmiştir.

## II. SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNTEMİ

### A. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik problemlerinin çözümlenmesi için geliştirilen ve diferansiyel denklemlerle ifade edilen sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemini avantajları;

- Hızlıdır.
- Birçok problem için uygulanabilir.
- Kompleks durumlar için kullanılabilir.
- Şekil değiştirme, gerilme ve konsolidasyonu zamana bağlı olarak değerlendirilmesini sağlar [12].

### B. PLAXIS

Geoteknik projelerinin tasarımı sırasında ihtiyaç duyulan zemin yapı etkileşimi, gerilme şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, stabilite analizleri, zemin dinamiği gibi konuların incelenmesini ve çözümlenmesini sağlayan programdır [12].

## 1. PLAXIS'te Zemin Modelleme Yöntemleri

### a. Mohr-Coulomb Zemin Modeli

Mohr-Coulomb zemin modeli, mükemmel bir lineer elastik-plastik bir zemin modelidir. Bu model basitliği nedeni ile diğer modellemelere göre daha çok uygulamaya sahiptir. Beş girdi parametresi vardır. Mohr-Coulomb zemin modeli mukavemet parametrelerine (Kohezyon, içsel sürtünme açısı) bağlıdır [13].

### b. Pekleşen zemin Modeli

Pekleşen zemin modeli için üç çeşit sertlik tanımlanır. Bunlar üç eksenli yüklemeye rijitliği, üç eksenli yük-boşaltma rijitli, ödometre yüklemeye rijitliği' dir. Zeminin sertleşmesinden dolayı kaynaklanan yumuşamayı hesaba katmadan analiz yapar [14].

### c. Yumuşak zemin Modeli

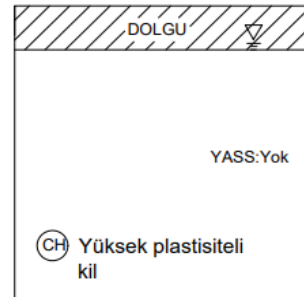
Yumuşak zemin modeli yumuşak zeminlerin davranışını modelleyen bir yöntemdir [14]. Yumuşak zemin modeli, hacimsel gerinim ile hacimsel gerilim arasında logaritmik bir ilişki olduğunu varsayar. Bu zemin modeli killi zeminlerde toprak malzemenin sıkışa bilirliğini tahmin edebilir [15]. Bu model kil zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılan aynı zamanda, elastik zemin davranışını öngören bir modeldir [14].

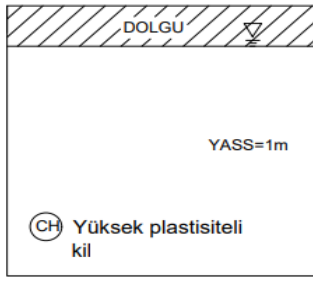
### d. Geogrid Modellemesi

Kumaş veya ızgara tabakasından oluşan ve esnek olan elemanlardır. Veri girişlerindeki en önemli parametre eksenel rijitlik, EA'dır. Eksenel rijitlik ise birim genişliğin eksenel kuvvetin ve eksenel gerinimin oranını ifade eder [14].

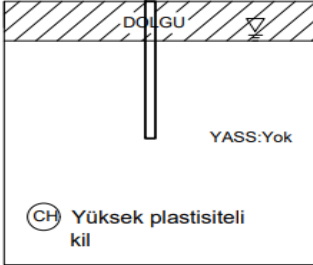
## III. MATERYAL VE YÖNTEM

Zemin dolgu ve yüksek- plastisiteli kil (CH) olan iki tabakadan oluşmuştur. Bu çalışmada kullanılan killi zemin parametreleri İstanbul İli, Zeytinburnu İlçesi'nde zemin etüdü sonuçlarından temin edilen geoteknik raporlardan alınmıştır. Aynı şekilde dolgu tabakası ise İstanbul İli, Bağcılar İlçesinin zemin etüt raporu sonucu geoteknik raporlardan temin edilmiştir. Zemin profilleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu şekilde Yer Altı Su Seviyesi (YASS) her durum için gösterilmiştir.



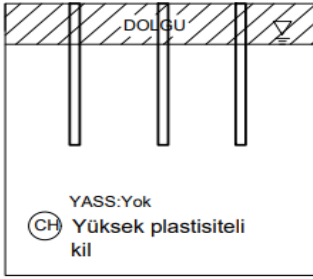


$E_{ur}$ (kN/m <sup>2</sup> )	62400
Poisson Oranı	0,30
Efektif İçsel Sürtünme Açısı	11,95
Kohezyon (kN/m <sup>2</sup> ) C	45
Genleşme Açısı $\psi$	0
$\nu/\nu_{ur}$	0,2
Ref. Gerilme kN/m <sup>2</sup> ( $p^{ref}$ )	100
Sıkışma İndisi	0,080809
Şişme İndisi	0,01616

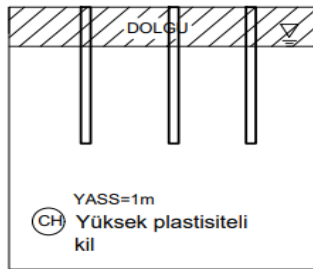


Zeminde dolgu kısım için permabilite değeri 10<sup>-2</sup> cm/sn (86,4 m/gün) olarak alınmıştır [15]. Bu çalışmada kapsamında kullanılan dolgu katman parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Dolgu Parametreleri



Tanım	Dolgu
Zemin Modeli	Pekleşen zeminModel
Drenaj Durumu	Drenajsız
Kuru Birim Hacim Ağırlık(kN/m <sup>3</sup> )	15,00
Doygun Birim Hacim Ağırlık(kN/m <sup>3</sup> )	15,00
Permabilite kx(m/gün)	86,4
ky (m/gün)	86,4
Elastisite Modülü E (kg/cm <sup>2</sup> )	100
$E_{50}$ (kN/m <sup>2</sup> )	9806,65
$E_{oed}$ (kN/m <sup>2</sup> )	9806,65
$E_{ur}$ (kN/m <sup>2</sup> )	29419,95
Poisson Oranı	0,41
Efektif içsel sürtünme açısı	20
Kohezyon (kN/m <sup>2</sup> ) C	4,9
Genleşme açısı $\psi$	0
$\nu/\nu_{ur}$	0,2
Ref. gerilmekN/m <sup>2</sup> ( $p^{ref}$ )	100



Şekil 1: Çalışmada Kullanılan Zemin Modelleri

Killi zemin için modelleme parametreleri Tablo1’te gösterilmiştir.

Tablo1: Killi zemin parametreleri

Malzeme	Yüksek-Plastisiteli Kil (CH)
Zemin Modeli	Cam-Clay Model
Drenaj Durumu	Drenajsız
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	14,65
Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	18,55
Permabilite kx (m/gün)	19,44x10 <sup>-6</sup>
ky (m/gün)	19,44x10 <sup>-6</sup>
Elastisite Modülü E (kN/m <sup>2</sup> )	-
$E_{50}$ (kN/m <sup>2</sup> )	20800
$E_{oed}$ (kN/m <sup>2</sup> )	20800

Bu çalışmada kullanılan kum SP sınıfı (kötü derecelendirilmiş) dir. Kum için kuru birim hacim ağırlık, 15,5 kN/m<sup>3</sup> [16], elastisite modülü; 80000 kN/m<sup>2</sup> [17], kohezyon; 1,96 kN/m<sup>2</sup> [18], permabilite 8,64 m/gün [19] parametreleri kullanılmıştır. Tablo 3’te kum kazık modelleme için parametreler verilmiştir. Kum kazıklar Mohr-Coulomb model ile drenajlı olarak modellenmiştir. Bu çalışmada modellenen sistemde tek bir kazık ve (üçlü) grup kazık oluşturulmuş, üzerine 578 kN/m<sup>2</sup> düzgün yayılı yük ile yükleme yapılmıştır.

Tablo 3: Kum Kazık Parametreleri

Özellikler	Değer
Zemin Modeli	Mohr - Coulomb
Drenaj Durumu	Drenajlı

Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	15,5
Doymun Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	18,0
Kohezyon C (kN/m <sup>2</sup> )	1,96
Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> )	80000
Poisson oranı	0,3
İçsel sürtünme açısı	30
Genleşme açısı $\psi$	1
Permabilitekx (m/gün)	8,64
Permabiliteky (m/gün)	8,64

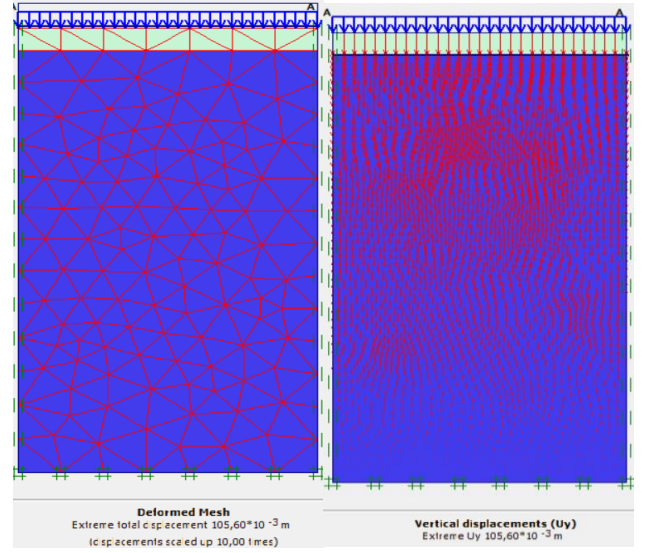
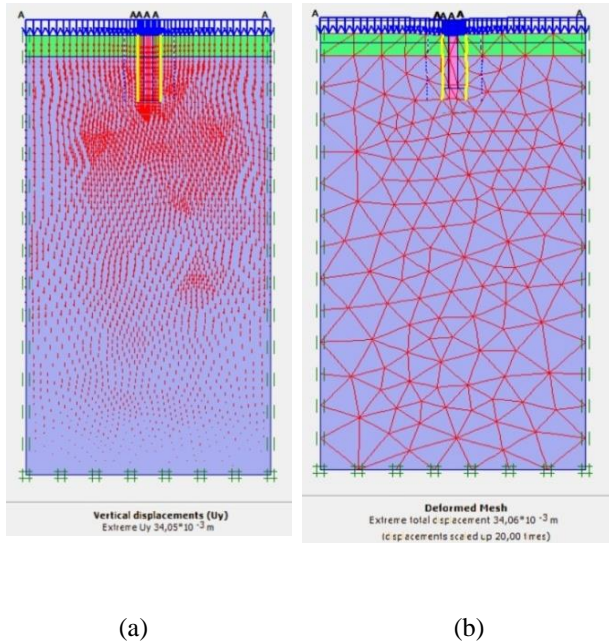
Araştırmada kum kazıklar arasındaki mesafe “S”, ile ifade edilirken, kum kazığının çapı ise “D” ile ifade edilir. Aynı şekilde L/D ise kum kazık için (uzunluk/çap) oranıdır ve oluşturulan modeller Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4: Kum Kazıkların Modellenmesi

Model	Uzunluk (L) (cm)	Çap(D) (cm)	L/D	Aralık (S) (m)
Model1	800	80	10	S <sub>1</sub> =2 S <sub>2</sub> =4
Model 2	300	35	8,57	S <sub>1</sub> =2 S <sub>2</sub> =4
Model 3	400	70	5,71	S <sub>1</sub> =2 S <sub>2</sub> =4

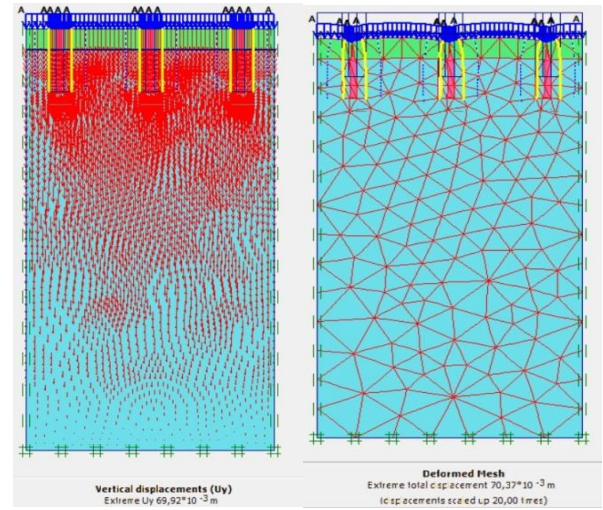
Oturmanın en az olduğu durum için kum kazıklar elastik rijitliği 1200 kN/m [20] olan geotekstil donatı ile tek sıra kaplanarak modellenmiş ve PLAXIS sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri yapılmıştır.

Çalışma kapsamında PLAXIS 2-D ile yapılan analiz çalışmaları aşağıda Şekil 2’de gösterilmiştir.



(c)

(d)



(e)

(f)

Şekil 2: En düşük yer değiştirme verileri; (a-b) L/D aralığı 8,75 olan en iyi durum için tek kazığın düşey

yer değiştirme ve deformasyon analizi, (c-d) suya doymun zeminin kazıksız durumda iken düşey yer değiştirme analizi, (e-f) L/D 8,75, kazık aralığı 4m olan grup kazıkların düşey yer değiştirme ve deformasyon analizi.

#### IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

İstanbul’un farklı ilçelerinde yapılmış olan zemin etüdü raporları sonucu geoteknik raporlardan temin edilen parametreler kullanılarak, zemindeki taşıma kapasitesi ve killi zemin içerisine yerleştirilen kum kazıklarının performans değerlendirmesi sonlu elemanlar yöntemi PLAXIS 2D ile yapılmıştır. Suya doymun killi zemin için en düşük oturma değeri kazıklar arası mesafenin 4 m olduğu L/D oranının 8,57 olduğu 69,92 mm dür. Diğer analiz sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. Kuru zemin için en düşük oturma değeri 34,05 mm’dir. Kuru zemin için ise analiz

sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Çıkan sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda gösterilmiştir.

- Yeraltı su seviyesi 1 m'de ve kazıksız halde iken zeminde oturma 105,60 mm'dir. Zemin içerisine tek kazık yerleştirildiği durumda iken zemindeki oturma L/D oranı 10 iken 85,27 mm, L/D oranı 8,57 iken 73,40 mm, L/D oranı 5,71 iken 74,05 mm'dir.
- Yeraltı su seviyesi 1m'de ve kazıklar arası mesafenin 2 m olduğu üçlü kazık (grup kazık) durumunda zemindeki oturma L/D oranı 10 iken

91,75mm, L/D oranı 8,57 iken 71,80mm ve L/D oranı 5,71 iken 72,68 mm'dir.

- Yeraltı su seviyesi 1m'de, kazıklar arası mesafenin 4m olduğu üçlü kazık (grup kazık) olduğu durumda zemindeki oturma, L/D oranı 10 iken 90,28mm, L/D oranı 8,57 iken 71,51mm ve L/D oranı 5,71 iken 72,10 mm'dir.
- Bu veriler neticesinde yeraltı su seviyesinin 1m olduğu durumda (doygun) halde en iyi zemin düşey yer değiştirme L/D oranının 8,57, kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durumdur.

Tablo5: Suya doygun yüksek plastik kil içerikli zeminin 578 kPa yük altında analiz sonuçları (YASS=1 m)

Durum	TEKİL KAZIK			ÜÇLÜ KAZIK					
	UZUNLUK/ÇAP (L/D)			ARA MESAFE (S:2m)			ARA MESAFE (S:4m)		
	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71
Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	515,81	510,02	512,52	519,42	509,46	513,11	515,04	508,97	512,91
Düşey Yer Değiştirme (m) ×10 <sup>-3</sup>	85,27	73,40	74,05	91,75	71,80	72,68	90,28	69,92	72,10
Kayma Deformasyonu (%)	3,92	4,46	2,63	3,65	4,41	2,28	2,65	4,34	1,9
Toplam Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	944,01	944,56	944,39	943,83	944,37	944,23	943,72	944,37	944,15
Deforme Olmuş Ağ (m) ×10 <sup>-3</sup>	85,64	73,40	74,57	91,16	72,64	73,35	90,70	70,37	71,81

Tablo 6: Kuru yüksek plastik kil içerikli zeminin 578 kPa yük altında analiz sonuçları

Durum	TEKİL KAZIK			ÜÇLÜ KAZIK					
	UZUNLUK/ÇAP (L/D)			ARA MESAFE (S:2m)			ARA MESAFE (S:4m)		
	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71	10	8,57	5,71
Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	510,89	508,99	509,26	507,27	509,07	506,8	-507	508,65	507,83
Düşey Yer Değiştirme (m) ×10 <sup>-3</sup>	39,78	34,03	35,99	44,21	34,67	37,41	42,97	33,97	36,94

<b>Kayma Deformasyonu (%)</b>	1040	749,93	720,77	707,03	663,30	597,78	635,89	698,98	594,74
<b>Toplam Gerilme (kN/m<sup>2</sup>)</b>	640,33	603,14	681,16	677,94	630,25	675,7	662,71	610,56	674,05
<b>Deforme Olmuş Ağ (m) ×10<sup>-3</sup></b>	39,78	34,03	35,99	44,21	34,67	37,41	42,97	33,97	36,94

- Bu sonuçlar neticesinde killi zemin içerisine L/D oranı 8,57 olan tek kazık yerleştirildiğinde kazıksız duruma göre zemindeki düşey yer değiştirme %30,49 azalma göstermiştir. Ayrıca L/D oranı 8,57 için kazıklar arası mesafenin 2 m olduğu üç kazık (grup kazık) halinde zemindeki düşey yer değiştirme, kazıksız duruma göre %32 azalma göstermiştir. L/D oranı 8,57 için kazıklar arası mesafenin 4m olduğu üç kazık (grup kazık) durumunda ise kazıksız duruma göre zemindeki düşey yer değiştirme %33 tür.
- Killi zeminin kuru olduğu aynı koşullar altında zemin içerisine tek kazık yerleştirildiği durumda iken zemindeki düşey yer değiştirme L/D oranı 10 iken 39,78 mm, L/D oranı 8,57 iken 34,03 mm, L/D oranı 5,71 iken 35,99 mm'dir.
- Yeraltı su seviyesinin olmadığı ve kazıklar arası mesafenin 2 m olduğu üçlü kazık (grup kazık) durumda zemindeki oturma L/D oranı 10 iken 44,21mm, L/D oranı 8,57 iken 34,67 mm ve L/D oranı 5,71 iken 37,41 mm'dir.
- Yeraltı su seviyesinin olmadığı kuru zemin için, kazıklar arası mesafenin 4m olduğu üçlü kazık (grup kazık) olduğu durumda zemindeki oturma, L/D oranı 10 iken 42,97 mm, L/D oranı 8,57 iken 34,28 mm ve L/D oranı 5,71 iken 36,94 mm' dir.
- Killi zeminin kuru olduğu (yeraltı su seviyesinin olmadığı) durum için zeminde en iyi düşey yer değiştirme L/D oranı 8,57 olan zemin içerisine yerleştirilen tek kazık olduğu durumdur.
- Killi zeminlerde düşey yer değiştirme zemin kuru halde iken, zeminin suya doygun haline göre daha azdır.
- Zemin kuru halde iken tekil kazık, kazıklar arası mesafenin 2m olduğu durum ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durum için tüm düşey yer değiştirme değerleri birbirine çok yakındır.
- Suyun olmadığı (kuru) killi zemindeki L/D oranı 8,57 olan tek kazık durumu için düşey yer değiştirme, suya doygun killi zemin için L/D oranı 8,57 olan en iyi durumdaki tekil kazıktaki yer değiştirmeye göre %53,63 daha iyidir.
- Suyun olmadığı (kuru) killi zemindeki L/D oranı 8,57 olan üçlü (grup) kazık durumu ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu durum için düşey yer değiştirme, suya doygun killi zemin için L/D oranı 8,57 olan ve kazıklar arası mesafenin 4m olduğu en iyi durumdaki üçlü (grup) kazıktaki yer değiştirmeye göre, yaklaşık %51 daha iyidir.
- Grup kazık etkisi incelendiğinde, kazıklar arası mesafenin S:4m olduğu durumda düşey yer değiştirme kazıklar arası mesafenin S:2m olduğu duruma göre daha azdır. Daha iyi sonuç göstermiştir.

## TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan bazı parametreler Tünges Mühendislik firmasından temin edilen geoteknik rapor sonuçlarından elde edilmiştir. İlgili firmaya yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

## V. KAYNAKLAR

- [1] Alkhorshid, N.R, "Analysis of Geosynthetic Encased Columns in Very Soft Soil". Tese de Doutorado, Publicação G.TD-133/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p., 2017
- [2] Hasan, M. "Analytical methods for predicting load-carrying capacity of granular piles—A Review" 7th Indian Young Geotechnical Engineers Conference, 2019.
- [3] Hong, Y. S., Wu, C. S., Kou, C. M., & Chang, C. H. "A numerical analysis of a fully penetrate encased

granular column." Geotextiles and Geomembranes, 45(5), 391-405, 2017.

[4] Hosseinpour, I., Soriano, C., & Almeida, M. S. "A comparative study for the performance of encased granular columns", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(2), 379-388, 2019

[5] Khabbazian, M., Kaliakin, V. N., & Meehan, C. L. "Numerical study of the effect of geosynthetic encasement on the behavior of granular columns". Geosynthetics International, 17(3), 132-143, 2010

[6] Khan, M., Hussain, S., Naseer, S., Jamil, S. M., & Ali, L. A. "Comparative Study of Ground Improvement by Lime and Granular.", In 8 th INTERNATIONAL CIVIL ENGINEERING CONGRESS, (p. 281), 2016

[7] Mohapatra, S. R., Rajagopal, K., & Sharma, J. "3-Dimensional numerical modeling of geosynthetic-encased granular columns", Geotextiles and Geomembranes, 3(45), 131-141, 2017.



- [8] Mohapatra, S. R., Rajagopal, K., & Sharma, J. "Direct shear tests on geosynthetic-encased granular columns". *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 396-405, 2016.
- [9] Orekanti, E. R., & Dommaraju, G. V. "Load-settlement response of geotextile encased laterally reinforced granular piles in expansive soil under compression", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(3), 1-8, 2019
- [10] Sharma, R. S., Kumar, B. P., & Nagendra, G. Compressive load response of granular piles reinforced with geogrids. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(1), 187-192., 2004
- [11] Sohaib, N., Sarfraz Faiz, M., & Sami, M. F. "Experimental Study on Improvement of Soft Clay Using Sand Columns.", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 14, 391-401, 2020.
- [12] Bayram, A. "Hava alanları pist dolgularının geosentetik malzemeler kullanılarak güçlendirilmesi", Yüksek lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ss:44-45, 2006
- [13] Çelik, S. Comparison of Mohr-Coulomb and hardening soil models' numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(4), 95-102, 2017.
- [14] PLAXIS-2D USER MANUAL, "PLAXIS 2D Version 8 Material Models Manual", 2021
- [15] Kahlström, M. "PLAXIS 2D comparison of Mohr-Coulomb and soft soil material models", Master of Science Program Luleå University of Technology., 2013.
- [16] Naseer, S., Faiz, M. S., Iqbal, S. ve Jamil, S. M. "Laboratory and numerical based analysis of floatings and columns in clayey soil." *International Journal of Geo-Engineering*, 10(1), (ss:8), 2019.
- [17] Çalık, Ö. "Donatılı duvarların (zeminlerin) sayısal analizi" Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss:46, 2018
- [18] Günaydın, O., Alpyıldız, S., Akkuş, Ç. "SP (Kötü Derecelenmiş Orta-İnce Kum) Zeminlerde Kesme Hızının Kesme Direnci Parametreleri Üzerine Etkisi." *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(1), (ss:7), 2004
- [19] Evirgen, B., Onur, MI, Tuncan, M., & Tuncan, A. Doymuş taneli zeminlerin serbest basınç dayanımı ve geçirgenliği üzerindeki donma etkisinin belirlenmesi. *GEOMATE Dergisi*, 8 (16), 1283-1287, 2015.
- [20] Töremiş, E. İlke. "Geotekstiller Ve Plaxis Sonlu Elemanlar Programı.", Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003, (ss:47)



## İzmit Körfez Geçiş Köprüsü (Osman Gazi Köprüsü) Hersek Burnu ayağı kuru havuz inşaatında zemin ve jeoteknik tasarım parametrelerinin korelasyon yöntemleriyle belirlenmesi sonucu karşılaşılan sorunlar

Problems encountered as a result of the determination of soil and geotechnical design parameters by correlation methods in the construction of the Izmit Bay Crossing Bridge (Osman Gazi Bridge) Hersek foot dry dock construction

Mehmet İNCE<sup>1\*</sup>, Ahmet KARAKAŞ<sup>2</sup>, Özkan CORUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, [mehmetince18966@gmail.com](mailto:mehmetince18966@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6434-0405>

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, [akarakas@kocaeli.edu.tr](mailto:akarakas@kocaeli.edu.tr), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4672-2063>

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, [coruk@kocaeli.edu.tr](mailto:coruk@kocaeli.edu.tr), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5072-200X>

### MAKALE BİLGİLERİ

### ÖZ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 10 Haziran 2022  
Revizyon 18 Ekim 2022  
Kabul 22 Kasım 2022  
Online 31 Aralık 2022

#### Anahtar Kelimeler:

Kil, palplanş, kuru havuz, zemin parametreleri, susuzlaştırma.

İzmit Körfez Geçiş Köprüsü Projesi'nde köprü keson temellerine ait inşaat işlerinin % 70'lik kısmı 22.820 m<sup>2</sup> alana sahip kuru havuzda yapılmıştır. - 7.50 metre derinliğe sahip kuru havuzun, çalışma platformu imkânı sağlayan çevre deniz dolgusu, susuzlaştırma ve kazı şev stabilite amaçlı palplanşların çakılması, havuz dışı kaya koruması, havuz içi kazısı aşamalarıyla inşa edilmiştir. Mühendislik jeolojisi çalışmaları ile belirlenen zemin parametreleri kullanılarak hazırlanan kuru havuz tasarımında karaya paralel taraf (doğu yönü) palplanşları 12.00 m ve diğer üç kuzey, batı ve güney tarafları 18.00 m olarak hesaplanmıştır. Ancak İngiltere merkezli kontrol firması, tasarımda kullanılan yerel zemin parametre değerlerini çok yüksek olarak yorumlamıştır. Yorumlara paralel hazırlanan ve korelasyonlarla belirlenen jeoteknik parametrelere göre tasarım revizyonu ile palplanş boyları 16.00 ile 24.00 metre olarak belirlenmiştir. Bu yeni tasarıma göre yapılan palplanş çakım uygulaması planlanan ve karşılaşılan sorunların çözümü için bilinen tüm ilave uygulama yöntemlerinin devreye sokulmasına karşın, proje sonunda 24.00 metre olarak çakılması planlanan palplanşların çakım derinliği en fazla 20.37 metre olarak gerçekleşmiştir. Zaman ve ilave yöntemlerden kaynaklı inşaat maliyeti artarken yaklaşık 1900 metre palplanş zayıfatı olmuştur. Mühendislik jeolojisi modeli ve özellikle kil tabakasının mekanik dayanımının tekrar teyit amaçıyla, 5 adet ilave zemin araştırma sondajı yapılmıştır. Sondaj verilerinin değerlendirilmesi sonucunda, ilk tasarımın ve bu tasarımda belirlenen palplanş boylarının yeterli olduğu, 18.00 metreden daha derindeki kil tabakasının jeoteknik parametrelerinin palplanş çakımına uygun olmadığı tespit edilmiştir. Mühendislik yapılarının tasarımında standartlaştırılmış veya korelasyona dayalı zemin parametrelerinden ziyade yerinde zemin araştırmalarına dayalı zemin ve jeoteknik tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve kullanılması yapı güvenliği, zaman ve mali kayıpların yaşanma olasılığını ve riskini bu örnekte de olduğu gibi azaltmaktadır.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article history:

Received 10 June 2022  
Received in revised form 18  
October 2022  
Accepted 22 November 2022  
Available online 31 December 2022

#### Keywords:

Clay, sheet piling, dry dock, soil parameters, dewatering.

Doi: 10.24012/dumf.1128735

\* Sorumlu Yazar

In the Izmit Bay Crossing Bridge Project, 70% of the construction works of the bridge caissons were carried out in a dry dock with an area of 22,820 m<sup>2</sup>. The dry dock with a depth of - 7.50 meters was built with the surrounding armor rock fill, which provides a working platform, the piling of sheet piles for dewatering and excavation slope stability, the rock protection outside the dock, and the excavation in the dock. In the dry dock design, which was prepared using the soil parameters determined by engineering geology investigation, the parallel to the land (east direction) sheet piles were calculated as 12.00 m and the other three north, west and south sides were calculated as 18.00 m. However, the UK-based control firm interpreted the local soil parameter values used in the design as too high. According to the geotechnical parameters prepared in parallel with the comments and determined by the correlations, the sheet pile lengths were determined as 16.00 and 24.00 meters with the design revision. Despite the fact that all known additional application methods were used to solve the problems encountered and planned for the sheet pile driving application made according to this new design, the driving depth of the sheet piles, which was planned to be driven at 24.00 meters at the end of the project, was 20.37 meters at the most. While the construction cost increased due to time and additional methods, approximately 1900 meters of sheet piling were wasted. In order to reconfirm the engineering geology model and especially the mechanical strength of the clay layer, 5 additional soil investigation drillings were carried out. As a result of the evaluation of the drilling data, it was determined that the initial design and the sheet pile lengths determined in this design were sufficient, and the geotechnical parameters of the clay layer deeper than 18.00 meters were not suitable for sheet piling. Determining and using soil and geotechnical design parameters based on in situ soil investigations rather than standardized or correlation-based soil parameters in the design of engineering structures reduces the possibility and risk of experiencing building safety, time, and financial losses, as in this example.

## Giriş

Bu çalışma kapsamında, tasarım verileri ile saha uygulaması arasındaki oluşan farkların; maliyet, süre ve problemin çözümüne dair etkisi bir vaka analizi olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, İzmit Körfez Geçiş (İKG) Köprüsü (Osman Gazi Köprüsü) Hersek Burnu ayağı kuru havuz tasarımı için gerekli zemin parametrelerinin korelasyona dayalı yöntemleriyle belirlenmesi sonrası karşılaşılan sorunlar ele alınmıştır. Kuru havuz tasarımı için gerekli palplans boyuları, inşaat alanındaki sondaja dayalı ve zemin araştırması ile belirlenmiştir. Bu araştırma sonrası, palplans malzeme özellikleri, kuru havuz kullanım süresi, deniz dolgu malzeme özellikleri ve yapı kesitleri hesaba katılarak kara (doğu) tarafında 12.00 m ve diğer üç kenarda (kuzey, batı ve güney) 18.00 m olarak hesaplanmıştır. Kuru havuz taban alanı ve çevresinden gelecek yeraltı suyu akışını engelleyecek ve şev stabilitesini sağlayacak palplanslar tasarım olarak sert kil tabakasına yeterli derinlikte soketlenecek şekilde belirlenmiştir. Projenin kontrol firması zemin araştırma raporlarındaki kilin mekanik özelliklerini yani bu rapora bağlı zemin parametrelerini çok yüksek bulmuş, palplans tasarımında kullanılan yerel zemin parametrelerin yeterli olmadığını ve değerlerinin düşülmesini talep etmiştir. Kontrol firmanın yorumlarına bağlı olarak kuru havuz tasarımı revize edilmiştir. Palplans boyuları kara tarafında 16.00 m ve diğer üç kenarda ise 24.00 m olarak yeniden projelendirilmiştir. Bu projeye göre uygulamaya geçilmiştir. Ancak sahada palplans çakımı sırasında aşırı zorlama sonucu palplansların burulduğu, parçalandığı ve kızaklardan kurtulduğu gözlenmiştir. Planlanmış iş makineleri ile revize edilen projedeki kotlara inilemeyeceğinin anlaşılması, daha sonra devreye sokulan yeni tedbirlerin de yetersiz kalması ile aşağıdaki uygulama yöntemleri sırası ile devreye alınmıştır. Bunlar;

1. Türkiye'deki mevcut en yüksek titreşimli çekiç kullanılmıştır.
2. Palplanslara su jeti montajı yapılmıştır
3. Çakımı kolaylaştırmak için palplans hattı boyunca jet grout makinası ile 0.50 m arayla ve palplans alt kotunun bir metre üstüne kadar ulaşan delikler delinmiştir
4. Hidrolik çekiç kullanılmıştır.

Bu yöntemlerle, 16.00 m planlanmış palplanslar hesaplanan kotlara kadar çakılabilmişken 24.00 m planlanmış palplanslar ortalama 20.37 m olarak çakılabilmiştir. Zemin üzerinde +1.60 m kotu üstünde kalan palplanslar kesilmiştir. Çok fazla miktarda palplans zayıtı olmuştur. İlave maliyet ve zaman kayıpları yaşanmıştır. Palplans çakımları sonrası alanda susuzlaştırma, kazı ve yapılış amacına uygun olarak kesonların inşaatı tamamlanmıştır. Kesonların havuzdan yüzdürülmesi sonrası palplansların çekimine başlanmıştır. Kuru havuzun görevini tamamlaması sonrası palplansların çekiminde de zorluklar yaşanmıştır. Türkiye şartlarında en yüksek kapasiteli titreşimli çekiç kullanımı ihtiyaç olmuştur. Bazı palplanslar çekilememiş deniz tabanında kesilmek zorunda kalmıştır. Yaşanan problemler iş programında gecikme ve bununla birlikte maliyet artışlarına neden olmuştur.

Zeminlerin jeolojik kökeni ve fasiyes özellikleri, belirli bir bölgede mevcut olabilecek zemin türleri için bir gösterge

oluşturmaktadır. Zemin parametrelerinin nümerik değerleri ve davranışı, zeminin oluşumu nasıl olursa olsun yapısal ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu nedenle mühendislik uygulamaları ve projelendirme açısından zemin jeoteknik-geoteknik parametrelerinin gerçeğe en yakın temsili değerlerinin seçilebilmesi için istatistiksel bir yaklaşıma gereksinim duyulmaktadır. İstatistiksel yaklaşımlar, genellikle çok az sayıdaki deneye ve veriye dayanılarak elde edilen jeoteknik-geoteknik parametrelere ne kadar güvenebileceğini matematiksel bir kesinlikle ifade edebilme olanağını vermektedir [1]. Arazi ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen parametrelerin en ufak bir benzerliğinin bulunmadığı örnekler sayılamayacak kadar çoktur [2].

Kuru havuzların tasarım ve inşasına genel bir bakış operasyon alanları, ana gereksinimler, inşaat sürecinde kullanılan yapı malzemeleri, tasarımda etkili faktörler, her tipin avantajları ve dezavantajları [3] ile verilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yerinde elde edilmiş mühendislik jeolojisi verileri ile benzer zemin malzemelerinden türetilen jeoteknik parametrelerin projeye uygulanmasında karşılaşılan zorluklar bir vaka analizi şeklinde verilmektedir. Proje kapsamında Osman Gazi Köprüsü Hersek Burnu ayağı kuru havuz tasarımında çakım boyu 24.00 m olarak planlanan palplanslar hedeflenen derinliklerde çakılamamıştır. Daha yüksek kapasiteli titreşimli çekiç kullanımı, çakımı kolaylaştırıcı su jeti ve jet grout makinası ile palplans hattında delikler delinmesi gibi ilave metotlar devreye alınmak zorunda kalmıştır. 24 metrelik palplanslar en fazla 20.37 m olarak çakılabilmiştir. 1900 m palplans zayıtı olmuştur Çakım zorluklarına paralel olarak proje sonunda palplansların çekiminde de ciddi zorluklar yaşanmıştır. Kuru havuz inşaat aşamalarında planlanan metotlardan sapsmalardan kaynaklı ciddi mali ve zamansal kayıplar yaşanmıştır.

## Bulgular

Kuru havuz inşaat alanı Yalova Altınova İlçesi Hersek Burnu batı kesimindedir. Bu kesim Osman Gazi Köprüsü'nün (İKG) güney ankraj ve diğer köprü yaklaşım yapılarının da yer aldığı alandır. Kuru havuz alanı ile birlikte, güney ankraj ve diğer yaklaşım yapıları deniz dolguları üzerine inşa edilmiştir. İnceleme alanının lokasyonu Şekil 1'de, kuru havuz palplans çakım planı Şekil 2'de ve palplans deneme çakımı Şekil 3'te verilmektedir. Şekil 4'te palplans çakım çalışmalarından alınmış fotoğraflar verilmektedir.

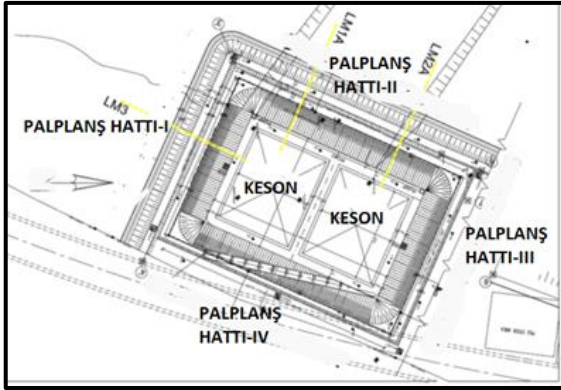
İzmit Körfezi'nin gelişiminde tektonik kuvvetlerin etkisi öne çıkmaktadır. Tektonik jeomorfolojik özellikler, bölge genelinde Kuzey Anadolu Fay sistemi ile ilişkilidir. Proje alanını, Hersek Yarımadası'nın doğusundaki Karamürsel Havzası'nın batı ucu, Hersek Yarımadası'nın ucundaki Dedeler Tepesi, Hersek Lagünü ve kısmen tektonik kaynaklı bir yelpaze deltası olan Hersek Yarımadası'dır [6].

Proje alanı Hersek deltasına ait genç alüvyal çökeller üzerinde yer alır. Hersek deltası, İzmit Körfezi güney kıyıları gerisindeki çok sayıda akarsuyun getirdiği malzemenin birikmesi sonucu oluşan ve şerit şeklinde bir kıyı çökeli görünümündedir. Gölcükten batıya doğru Ulaşlı, Karamürsel ve Ereğli dolayında bu alüvyal şerit daralmakta, Hersek ve Çatal deltalarında tekrar geniş alanları

doldurmaktadır. Çoğunlukla taşkın ovasında çökelen silt ve kil boyutundaki malzemeden oluşan bu deltalar günümüzde bataklıklar halindedir.



Şekil 1. İnceleme alanı lokasyonu



Şekil 2. Kuru havuz palplanş çakım planı



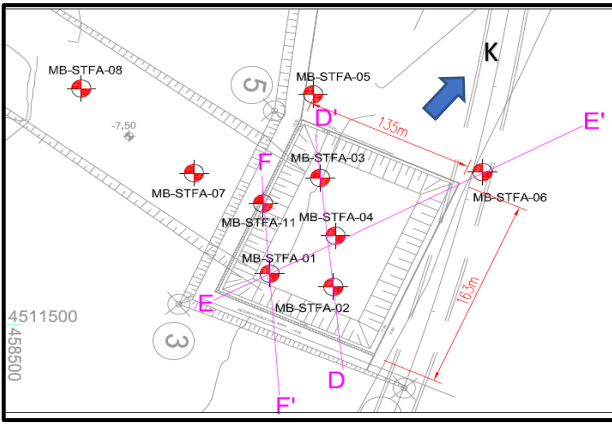
Şekil 3. Kuru havuz planı ve palplanş deneme çakımı



Şekil 4. Kuru havuz palplanş çakımı ile ilgili saha fotoğrafları

Altınova'nın kuzeybatısında Yalakdere deltasında ise kumlu ve siltli kırıntılılar egemendir. Hersek ve Subaşı köyleri civarında ise gevşek kum, siltli kum ve killi silt düzeyleri izlenir [7].

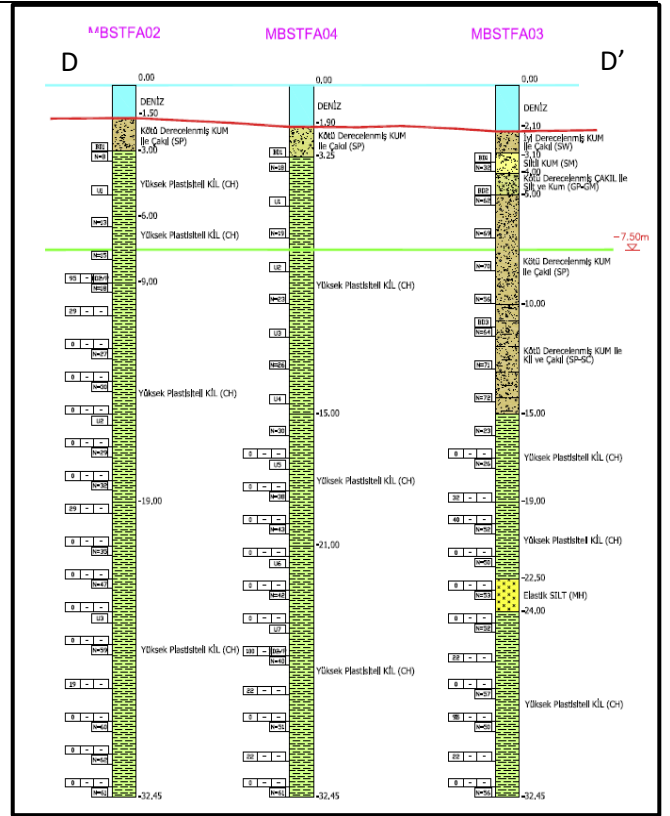
Proje kapsamında, kuru havuz sahasında, çevresinde ve denizde toplam 9 adet sondaj, 5 adet araştırma çukuru yaptırılmıştır [5]. Sondajlar ve zemin tanımları TS 19001 [9], BS 5930: 1999 [10] ve ASTM 2000 [11] şartnamelerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sondajlarda 1,50 m aralıklı standart penetrasyon testleri yapılmış olup kohezyonlu zeminlerden örselenmemiş zemin numunesi alınmış, zeminde ilerlemeler çift tüpü karotiyerler ile yapılmış 9 sondaj noktasından laboratuvar deneyleri için 208 adet örselenmemiş ve örselenmiş numune alınmıştır. Kuru havuz sahasında ve çevresinde yapılan sondajların planı Şekil 5'de, D-D' jeolojik kesiti Şekil 6 ve E-E' kesiti ise Şekil 7'de sunulmuştur.



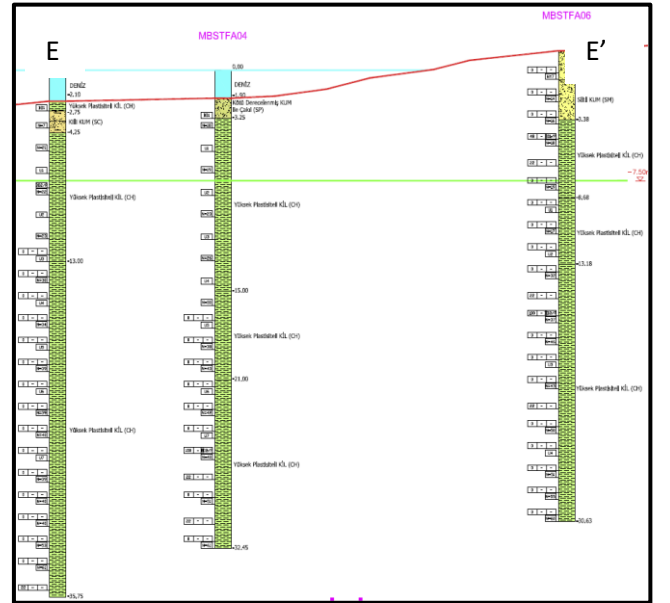
Şekil 5. Kuru havuz çalışma alanı sondaj planı [7]

Kuru havuz sahasının mühendislik jeolojisi modelini gösteren farklı yönlere D-D' ve E-E' mühendislik jeolojisi kesitleri Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Bu modele göre üstte kalınlığı 1.5-13 m arasında değişen kötü derecelenmiş çakıllı kum, siltli kum, seviyesi vardır. Bu seviyenin altında SPT-N<sub>30</sub> değerleri derinlikle artan sondajdaki kalınlığı yaklaşık 32 m olan çok katı-sert, yüksek plastisiteli kil seviyesi bulunmaktadır.

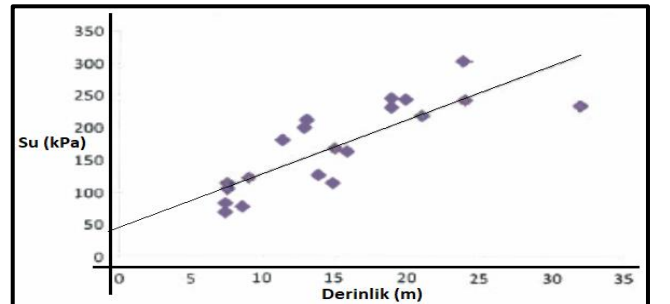
Sondaj derinlikleri 32.45 metre ile 52.95 metre arasında değişmektedir. Zemin kesitinde en üstte kalınlığı 1.00 m ile 4.70 m olan gevşek kum tabakası, altında ise katı/çok katı/sert yüksek plastisiteli kil tabakası tespit edilmiştir. Kum tabakası genelde SP-SM ve SC sınıfındadır. SPT- N<sub>30</sub> değerleri 6 ile 14 arasında değişmektedir. Kum oranı %50-60 arasındadır. Kil tabakası genelde CH sınıfındadır. SPT N<sub>30</sub> değerleri ortalama 10 metre derinliğe kadar 13 ila 22 arasında, 10 metre derinlikten itibaren ise 27 ila 77 arasındadır [7]. Laboratuvar deney sonuçlarına göre killerin likit limitleri (LL) 0.61 ile 0.67 arasında, plastisite indisleri (IP) 0.38 ile 0.43 arasındadır. Jeokimyasal analizlerde killerin egemen mineral türü kaolinit olarak belirlenmiştir. Kaolinit türü killerin şişme ve büzülme potansiyeli çok düşüktür. Laboratuvar deney sonuçlarına göre belirlenen drenajsız kayma dayanımının (Su) derinlikle değişimi Şekil 8'de verilmektedir. 18 metre derinlik dolayında drenajsız kayma dayanımı (Su) 200 kPa değerine ulaşmaktadır.



Şekil 6. D-D' Jeolojik kesiti



Şekil 7. E-E' Jeolojik kesiti



Şekil 8. Kayma mukavemetinin derinlikle değişimi

Zeminlerin mekanik özellikleri Tablo 1, sondajlarda rastlanan tabakaların özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 1. Zeminlerin mekanik özellikleri [7]

Sondaj No	Derinlik (m)	Üç eksenli Basınc Deneysi (C:kPa, $\Phi$ )	Tek eksenli Basınc Deneysi (kPa)
MBSTFA01	6,50-7,00	C:117 $\Phi$ :0	
MBSTFA02	4,50-5,00 10,20-10,50	C:62 $\Phi$ :3 C:58 $\Phi$ :3	
MBSTFA03	19,50-19,90	C:160 $\Phi$ :0	
MBSTFA04	5,00-5,50	C:98 $\Phi$ :0	
MBSTFA05	17,20-17,50 25,00-25,50	C:140 $\Phi$ :0 C:120 $\Phi$ :0	
MBSTFA06	7,50-7,80 16,50-16,80	C:54 $\Phi$ :0 C:38 $\Phi$ :5	
MBSTFA09	27,00-27,50 31,50-32,10 36,00-36,50 46,50-47,00	C:10 $\Phi$ :0 C:20 $\Phi$ :0	32,51 179,92

Tablo 2. Sondajlarda rastlanan tabakaların özellikleri [7]

Sondaj	Kotlar	Kalınlık (m)	Zemin	Ortalama N	Su (kPa)	$\Phi$ (°)	WL (%)	Wp (%)	$\gamma_n$ (KN/M3)
1	7,50-13,00	5,50	CH	23	104		66	24	19
	13,00-35,75	22,75	CH	44	198		60	23	19
2	7,50-9,00	1,50	CH	15	68				
	9,00-19,00	10,00	CH	27	122		66	24	18
3	19,00-32,45	13,45	CH	54	243				
	7,50-10,00	2,50	k.d.kum	63		>45			
	10,00-15,00	5,00	k.d.kum	69		>45			
	15,00-19,00	4,00	CH	25	113				
	19,00-22,50	3,50	CH	51	230		61	24	
	22,50-24,00	1,50	Elastik silt	53	239		68	43	
4	24,00-32,45	8,45	CH	54	242		65	23	
	7,50-15,00	7,50	CH	25	113		60	23	19
5	15,00-21,00	6,00	CH	37	167		66	24	
	21,00-32,45	11,45	CH	49	218				
6	7,50-8,00	0,50	k.d.kum	72		>45			
	8,00-11,00	3,00	silt	59	263				
	11,00-12,50	1,50	iyi d.kum	66		>45			
	12,50-14,00	1,50	kum	82		>45			
	14,00-16,00	2,00	iyi d.kum	77		>45			
	16,00-18,50	2,50	CH	36	162		56	22	19
7	18,50-20,00	1,50	CL				46	19	
	20,00-52,95	32,95	CH	54	242		64	24	18
8	7,50-8,68	1,18	CH	18	81		59	21	19
	8,68-13,18	4,50	CH	17	77		64	22	
9	13,18-30,63	17,45	CH	47	210		66	43	18
	7,50-7,75	0,25	iyi d.kum	72		>45			
10	7,75-24,00	16,25	k.d.kum	N>50		>45			
	24,00-33,05	9,05	CH	67	302		69	23	19
	7,50-8,25	0,75	iyi d.kum	44		45			
	8,25-10,00	1,75	k.d.kum	72		>45			
	10,00-10,80	0,80	kum	N>50		>45			
	10,80-20,50	9,70	kum	N>50		>45			
11	20,50-25,50	5,00	silt	N>50		>200			
	25,50-32,00	6,50	CL	40	180		40	22	
12	32,00-35,95	3,95	CH	52	234		62	26	
	7,50-8,00	0,50	k.d.kum	79		>45			
	8,00-9,50	1,50	kum	54		>45			
	9,50-11,50	2,00	k.d.kum	N>50		>45			
13	11,50-14,00	2,50	CH	40	180				
	14,00-19,00	5,00	CH	28	126		53		

Bu çalışma kapsamında gerekli analizler yazılım paketi PLAXIS 2D ile yapılmıştır. Kuru Havuzda iki farklı zemin modeline sahip küresel analiz modeli, inşaatın başlangıcından yapının beklenen 6 aylık işletme ömrüne kadar konsolidasyon oturumlarını tahmin etmek için uygulanmıştır. Global Model 1 (bundan sonra GM1 olarak anılacak) sığ kil zemin profil katmanlarını temsil ederken (Ref. Kuyular MB-STFA-04, 11, 01 ve 02), Global Model 2 (bundan sonra GM2 olarak anılacaktır) kum/çakıl katmanları ile kaplanmış derin kil zemin profilini (Ref. Kuyular MB-STFA-03, 05 ve 06) temsil etmektedir.

Ayrıca, güvenlik faktörlerini tam olarak elde etmek için hem Deniz tarafı hem de Kara tarafı dolguları için şev güvenlik analizleri yapılmıştır ve bant dolgular aşağıdaki gibi gösterilecektir.

Yerel Model 1A (LM1A) sığ kil katmanları üzerinde deniz kenarı dolgusunu, Yerel Model 1B (LM1B) sığ kil katmanları üzerinde kara dolgusunu, Yerel Model 2A (LM2A) daha derin kil katmanları üzerinde sahil dolgusunu, Yerel Model

2B (LM2B) daha derin kil katmanları üzerinde kara tarafı dolgusunu göstermektedir. Analiz parametreleri ve geometri global ve yerel modeller arasında aynıdır, ancak yerel modeller, global modellerinin daha güvenilir analiz veren kısaltılmış versiyonlarıdır. Hesap amaçlı temsili zemin profili Tablo 3’te verilmektedir.

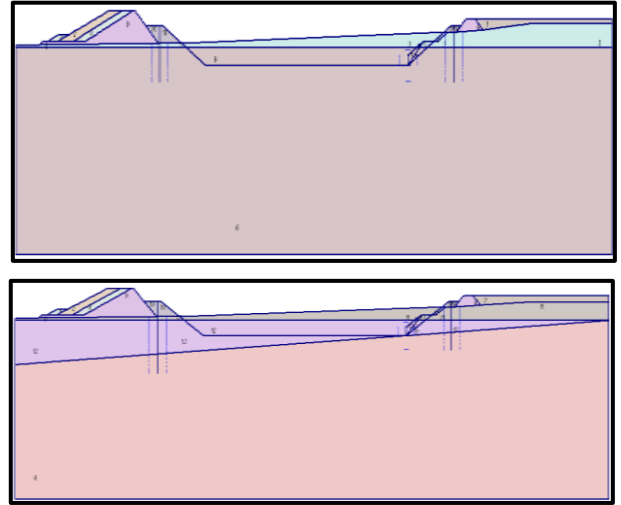
Tablo 3. Hesap amaçlı temsili zemin kesitleri [12]

Kesit		GM1 (m)	GM2 (m)
Birim A1 (Çakıllı Kum, Gevşek-O. Sıkı)	Üst Kot	-1.90	-2.10 (-) -1.32
	Alt Kot	-3.25	-3.10 (-) -3.38
Birim A2 (Çakıllı Kum, Sıkı-Çok Sıkı)	Üst Kot	Mevcut Değil	-3.10 (-) -3.38
	Alt Kot		-15,00 (-) -3,38
Birim B (Yüksek Plastisiteli Kil, Katı-Sert)	Üst Kot	-3.25	-15,00 (-) -3,38
	Alt Kot	-32.45	-32.45
Deniz Seviyesi :0,00m			

Sayısal modelleme, karmaşık doğrusal olmayan zemin davranışının ve çeşitli arayüz koşullarının, geometrilerin ve zemin özelliklerinin modellenmesine izin verdiği için sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Zemin Mohr-Coulomb modeli ile modellenmiştir.

Kuru Havuz ’da inşaat yapım süresi ve işletme ömrü, kil tabakalarının drenajlı bir şekilde davranması için yeterince uzun değildir. Bu nedenle kil tabakaları analizlerde drenajsız olarak kabul edilmiş ve tanımlanmıştır.

Model 1 ve Model 2 için dikkate alınan katmanların MC model parametrelerinin bir özeti Şekil 9’da ve Tablo 4’de verilmektedir.



Şekil 9. Sırasıyla GM1 ve GM2’nin zemin özelliği atamaları (PLAXIS 2D) [12]

Tablo 4. Zemin özellikleri/atamalar [12]

Zemin Malzemesi	Cluster No.	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cu (kPa)	C' (kPa)	$\Phi'$ (kPa)	Konc	Koc	E50 (Mpa)	mv (m <sup>2</sup> /Mn)
Birim A1 (Çakıllı Kum, Gevşek-O.Sıkı)	3-11	21	0	0	35	0.426	0.522	15	
Birim A2 (Çakıllı Kum, Sıkı-Çok Sıkı)	12	21	0	0	44	0.305	0.432	35-70	
Birim B (Yüksek Plastisiteli Kil, Katı-Sert)	6	18	50-120	5-10	25	0.577	1000	9-22	0.08
Çekirdek	9	22	0	0	40	0.357	0.619	50	
Filtre	8	22	0	0	40	0.357	0.619	50	
Armour	2	22	0	0	40	0.357	0.619	50	
Granül Dolgu	10	22	0	0	40	0.357	0.619	50	
Embankment	1	21	0	0	32	0.47	0.814	10	

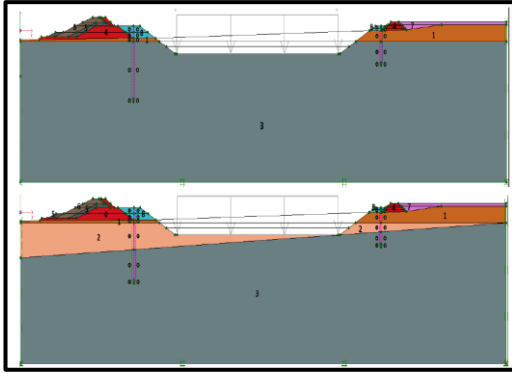
Konsolidasyon analizleri için iki farklı zemin modeli (GM1 ve GM2) ile global analiz modelleri geliştirilmiştir. Modeller, kuru çalışma alanına olası sızmayı önlemek için yeterli

uzunlukta çakılan palplanşların yanı sıra yukarıda verilen zeminlerin mukavemetini ve rijitliğini sağlamaktadır. Kuzey-Doğu kenar palplanşları, bu bölgedeki kil tabakaları Güney bölgesine göre daha derinde olduğundan -16.25 m, sıg kil tabakalarının dolduğu Doğu ve Güneydoğu katranında ise -10.25 m uç kotlarına kadar çakılması yeterli görülmüştür. Güneydoğu kadranda ve tüm kara dolgularında daha sıg killere ulaşır. Global muadillerinin türevi olan yerel modeller (LM1A, LM1B, LM2A ve LM2B) de şev güvenliği analizlerinde de bu fark dikkate almaktadır [12].

Kontrol firması ilk tasarım sonuçlarına göre belirlenen palplanş boylarını, tasarımda kullanılan zemin parametreleri ve güvenlik faktörü yorumlarına göre kısa bulmuştur. Yorumlarını yazılı olarak tasarımcı ile paylaşmış ve tasarımda revizyon talep etmiştir.

Yorumlarında Londra kilinin davranışı örnek gösterilmiş, proje kapsamında sondaj ve laboratuvar verileri ile hazırlanan zemin kesitinin yeterli olmadığı vurgulanmış, standartlaştırılmış veya korelasyona dayalı zemin parametrelerinin kullanılması önerilmiştir. Bu öneri doğrultusunda palplanş boyları kara tarafında 16.00 m ve diğer üç kenarda ise 24.00 m olarak projelendirmiştir. Projelendirmede 2/3 standart konsol boyu öngörülmüş ancak özellikle 3 kenardaki 18 metre derinlikten itibaren izlenen sert kilde palplanş çakımının gerçekleşip gerçekleşmeyeceği dikkate alınmamıştır. Havuzun I, II ve III kenar palplanşları uç kotları -22.40 m (Palplanş üst kotu +1.60 olduğundan toplam boy 24.00 m'dir), IV (kara tarafından)'de ise -14.40 m (Palplanş üst kotu +1.60 olduğundan toplam boy 16.00 m'dir), seviyesine kadar çakılmasına karar verilmiştir [13].

Model 1 ve Model 2 için dikkate alınan katmanların MC model parametrelerinin bir özeti Şekil 10 ve Tablo 5'de verilmektedir [13].



Şekil 10. Sırasıyla GM1 ve GM2'nin zemin özelliği atamaları (PLAXIS 2D) [13]

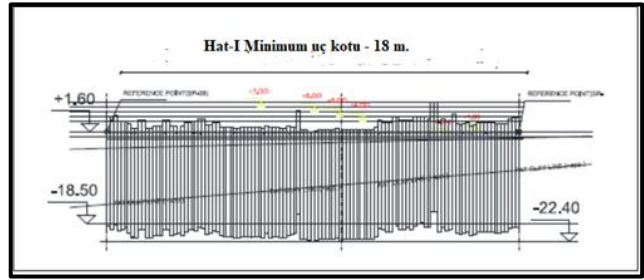
Tablo 5. Zemin özellikleri/atamalar [13]

Zemin Malzemesi	Cluster No.	γsat (kN/m <sup>3</sup> )	Φ' (kPA)	c' (kPA)	Konc	Koc	Mat. Mode	E50 (MPa)	Eur (MPa)	E' (MPa)	Davranış	Sismik
Birim A1 (Çakılı Kum/Geçek-Q Sıkı)	1	21	35	0	0.426	0.522	HS	15	60		Drenajlı	Drenajsiz
Birim A2 (Çakılı Kum, Sıkı-Cok Sıkı)	2	21	44	0	0.305	0.432	HS	42	168		Drenajlı	Drenajsiz
Birim B (Yüksek Plastisiteli Kil, Katı-Sert)	3	18	25	10-15 (c' <sub>inc</sub> =0.16 7 kPa/m)	0.577	1000	HS	4	12		Drenajsiz	Drenajsiz
Cekidek	4	22	40	0	0.357	0.357	HS	12	48		Drenajlı	Drenajlı
Filtre	5	22	40	0	0.357	0.357	MC	-	50		Drenajlı	Drenajlı
Armour	6	22	40	0	0.357	0.357	MC	-	50		Drenajlı	Drenajlı
Granül Dolgu	7	21	36	0	0.412	0.412	HS	18	72		Drenajlı	Drenajsiz
Embankment	8	22	40	0	0.357	0.357	HS	18	72		Drenajlı	Drenajlı

Bilinen tüm ilave metotların devreye sokulması sonrası dahi palplanşlar tasarımdaki uç kotlarına kadar çakılamamıştır. Tasarımda kullanılan zemin özellikle kil parametrelerinin

düşük kabul edilmesi ihtimaline karşı sahada 5 adet ilave sondaj yapılmıştır. Bu sondajlar sonucunda zemin kesitinde (+0.80)- (-1.70) arası dolgu, (-1.70-4.70) kum ve (-4.70-23.00) yüksek plastisiteli çok katı-sert kil tespit edilmiştir [8].

Orijinal tasarımın makul güvenlik ve deformasyonu sağlamak için -22.40 m palplanş uç seviyelerini göstermesine rağmen, palplanş Hattı I ve II'de ulaşılabilen nihai ortalama penetrasyonlar yaklaşık -18.00 m'dir. Palplanşların daha fazla çakılamayacağı kesinleşmesiyle alt kotu -18.00 m olacak şekilde tasarımın tekrar kontrol edilmesi talep edilmiştir. İlave tasarım analizine [14] göre elde edilen minimum -18.00 m penetrasyonlarının güvenlik ve makul deplasmanlar sunmak için hala yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Uygulanan palplanş penetrasyon seviyeleri Şekil 11'de yer almaktadır.



Şekil 11. Nihai palplanş penetrasyon boyları [14]

## Sonuçlar ve Tartışma

Kohezyonlu zeminlerde örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan ve dayanım/deformasyon parametrelerinin belirlenmesine yönelik laboratuvar deneyleri parametre seçimi için en geçerli yöntemdir. Kohezyonlu zeminler için türetilmiş parametre-saha deneyi zemin dayanımı korelasyonlarının, laboratuvar deneylerinin yapılamadığı koşullarda veya laboratuvar deneyleri sonuçlarını kontrol etmek amacıyla kullanılması doğru bir yaklaşımdır.

İlk tasarım raporunda, yüksek plastisiteli (B) kil için etkin zemin parametreleri  $c=5$  ila 10kPa ve  $\phi^i=25$  derece olarak verilmiştir [12]. GM1 zemin modelinde zemin türünün deniz tabanından sıg, bu nedenle şev güvenliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu, GM1 durumu analiz edildiğinde, zemin parametreleri için mevcut varsayım altında deniz kenarı dolgusunun stabil olmayacağı savunulmuştur. Tasarım raporundaki etkin mukavemet parametrelerinin, Plaxis analizi için uygun olmayan en kötü güvenilir parametreleri temsil ettiği, kendi modellerinde hem c hem de  $\phi$  değerinin artırılmasına rağmen stabiliteyi korumak için yine de palplanşların 18 metreden daha uzun olmasının gerektiği belirtilmiştir. Aynı zamanda ilk tasarım zemin modelinde daha düşük güvenlik faktörleri ve yüksek deplasman görüldüğü ifade edilmiştir.

Danışman firma ve tasarımcının analiz sonuçları arasındaki farklılıklar zemin davranış modeli ve ilgili parametreler konusundaki görüş farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Parametre seçimi konusunda tasarımcı firma tavsiye talep etmiştir. Yüksek plastisiteli kil için  $c'=15$  ila 25 kPa yüksek bulunmuş bu yüksek değerde başka bir projede kullanılmışsa referans verilmesi istenmiştir.  $c'$  değerinin 10 kPa düşürülmesi ancak katılığın değer olarak artırılması önerilmiştir.

Yapı tasarım çalışmalarında bölgesel standartlaştırılmış veya korelasyona dayalı zemin parametrelerinden ziyade yerinde zemin araştırmalarına dayalı zemin parametrelerinin kullanılması yapı güvenliği, zaman ve mali kayıpların yaşanma ihtimalini azaltacaktır. Palplanş çalışmasıyla ilgili teorik ve gerçekleşen çakım ve zayıt miktarlarını gösteren veriler Tablo 6'de görülmektedir.

Tablo 6. Teorik ve gerçekleşen çakım ve zayıt miktarları

Palplanş Boyu (m)	Palplanş Sayısı (Adet)	Teorik Palplanş Boyu (m)	Çakılan Boy (m)	Ortalama Çakım Boyu (m)	Zayıt Miktarı (m)
24	506	12,144.00	10,309.44	20.37	1,834.56
16	276	4,416.00	4,349.19	15.76	66.81
<b>Toplam</b>	<b>782</b>	<b>16,560.00</b>	<b>14,658.63</b>		<b>1,901.37</b>

Zemin davranışını yansıtan parametrelerin belirlenmesine yönelik korelasyonlar benzer jeolojik ortamlarda oluşmuş zemin koşulları için geçerli olup, farklı bölgelerde yer alan zeminler için ne derece sağlıklı oldukları detaylı araştırılmalıdır. Diğer taraftan korelasyonların türetildiği veri tabanları incelendiğinde genel eğilimden sapmaların yüksek olduğu, dolayısıyla korelasyonlardan elde edilen parametrelerde hata payının yüksek olabileceği sıkça gündeme getirilen bir husustur.

Gerek teorik yaklaşımları gerekse nümerik yöntemleri uygulayabilmek için en önemli aşama mühendislik jeolojisi modelinin doğru tanımlanması, diğer bir deyişle bu modeldeki zemin tabakalarının davranışını yansıtacak jeoteknik-geoteknik parametrelerin gerçekçi olarak belirlenebilmesidir. Yapısal analizlerde gerçeğe yakın modelleme yapabilmek, zemin yerel özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesiyle mümkündür.

Yapı tasarım girdisi olarak yerel zemin araştırma sonuçlarına dayalı zemin parametrelerinin kullanılması yerine korelasyonlara bağlı bölgesel zemin parametrelerin kullanılması sonuçları öngörülemez can ve mal kayıplarına sebep olabilir.

Arazi çalışmalarında yeterli veri elde edilememesi durumunda kullanılacak korelasyon yöntemlerinde formül veya grafiklerin benzer jeolojik ortamlarda oluşmuş zeminler için kullanılması gerektiği hesaba katılmalıdır. Mühendislik yapılarının tasarımında standartlaştırılmış veya korelasyona dayalı zemin parametrelerinden ziyade yerinde zemin araştırmalarına dayalı zemin ve jeoteknik tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve kullanılması yapı güvenliği, zaman ve mali kayıpların yaşanma olasılığını ve riskini bu örnekte de olduğu gibi azaltmaktadır.

## Yazar Katkıları

İnce: Çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama

Karakaş: Taslağın oluşturulması, revizyon

Coruk: Verilerin analizi ve yorumlanması, revizyon

## Teşekkür

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasından desteklerini esirgemeyen, proje kapsamındaki verileri kullanmamıza izin veren STFA-ECAP Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş ve Genel Müdürü Sayın Celalettin İLHAN, STFA İnşaat A.Ş'de uzun yıllar çalışarak kazandığı önemli deneyimlerini tarafımıza aktaran Sayın Murat TUTAN ve jeoloji yüksek mühendisi Sayın Fatih KÖROĞLU'na teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] YILMAZ, H.R. (1987): Zemin Geoteknik Parametrelerinin Değişkenliği, İstatistiksel Özellikleri ve İzmir, İç Körfezi Kuzey Kıyıları Zeminleri Üzerine Uygulamalar, İzmir, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- [2] ÇİNİCİOĞLU, S. F. Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı, İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm, Seminer- İMO İstanbul, 2005.
- [3] SADEGHİ, K., DERKİ, A., SLASH, A. Dry Docks: Overviews of Design and Construction, Academic Research International 9, 2018.
- [4] GASPARRE, A., 2005 Advanced Laboratory Characterization of London Clay, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London.
- [5] 28. Task 9-Preliminary Interpretive Rpt\_10 Apr 2010
- [6] CWI, 2012. Geotechnical Interpretative Report. Izmit Bay Bridge Crossing. Doküman No. IZMIT-COW\_REP\_DD\_GEO\_0001 (ss.21-22).
- [7] STFA, 2012. Sondaja Dayalı Zemin ve Temel Etüt Raporu, Rapor No. 2011.09.64.
- [8] Ay-Zemin Mühendislik, Kuru Havuz Zemin Araştırma Sondaj Logları, 2012.
- [9] İnşaat Mühendisliğinde Numene Alma Yöntemleri, TS 19001.
- [10] Code of Practice For Site Investigation, British Standard Institutions, BS 5930: 1999.
- [11] Standard Practice for Soil Investigation and Sampling by Auger Borings, ASTM D1452-80(2000).
- [12] IZMIT-EC-RPT-TWS-1000-0-Design report for the temporary dry dock.
- [13] IZMIT-EC-RPT-TWS-1000-2- Design report for the temporary dry dock.
- [14] 91.12.P.50.NEN.0013-Supplementary analysis results\_submitted\_Rev1.





## Sürdürülebilir kent yönetimi ve yeşil altyapı kavramı kapsamında çevreci yaklaşımlar: İskenderun örneği

### *Environmental approaches within the concept of sustainable urban management and green infrastructure: A case study in Iskenderun*

Talip TURNA<sup>1\*</sup>, Alper SOLMAZ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, talipturna@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6318-7245

<sup>2</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, alper.solmaz@iste.edu.tr

ORCID: 0000-0001-6928-3289

#### MAKALE BİLGİLERİ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 20 Ağustos 2022  
Revizyon 30 Eylül 2022  
Kabul 2 Ekim 2022  
Online 31 Aralık 2022

##### Anahtar Kelimeler:

*Yeşil altyapı Kurakçıl peyzaj  
Yağmursuyu yönetimi, Atıksu  
yönetimi, Yeşil liman*

#### ÖZ

Yaşam dinamiklerinin farklılaşmasından doğan göçler nedeniyle kent nüfusları beklenenin üzerinde gerçekleşmektedir. Kentsel alanların bu göçleri karşılayabilecek altyapıya sahip olması sürdürülebilirlik açısından elzem olmakla birlikte son yıllarda küresel ısınmaya bağlı olarak yaşanan iklim değişikliği ve bunun çevresel tahribatları, özellikle kentsel alanlarda daha yoğun bir şekilde hissedilmektedir. Bu nedenle kentlerde aşırı nüfus yoğunluğunun ihtiyaçlarını karşılayabilecek sürdürülebilir yönetim anlayışlarına ihtiyaç vardır. Bu noktada hem çevreci hem de sürdürülebilir özelliklere sahip olan, ekonomik değerler ile çevresel değerler arasında bir denge kurarak kent yönetimini hedefleyen yeşil altyapı anlayışı son dönemlerde kent tasarımlarında ve halihazır kentlerin doğayla olan tezatlığının engellenmesinde yerini almıştır. Bu olgu çerçevesinde liman kenti olan İskenderun ilçesi özelinde nitel gözlemlere dayalı gerçekleştirilen çalışmada yeşil altyapı bileşenlerinden kurakçıl peyzaj, sürdürülebilir tarım, yağmursuyu yönetimi, atıksu yönetimi ve yeşil liman kavramları incelenmiş, kentin mevcut ve olası genişleme durumlarının sürdürülebilir kent yönetimi anlayışı ile gerçekleştirilmesine ışık tutulmaya çalışılmıştır.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 20 August 2022  
Received in revised form 30  
September 2022  
Accepted 2 October 2022  
Available online 31 December 2022

##### Keywords:

*Green infrastructure, Xeric  
landscape, Stormwater management,  
Wastewater management, Green  
harbo*

#### ABSTRACT

It is essential for sustainability that urban areas have the infrastructure to meet these migrations. In addition, climate change and its environmental damage due to global warming in recent years have been felt more intensely, especially in urban areas. For this reason, there is a need for sustainable management approaches that can meet the needs of overpopulation in cities. At this point, the understanding of green infrastructure, which has both environmentalist and sustainable features, and aims at city management by establishing a balance between economic values and environmental values, has recently taken its place in urban designs and in preventing the contrast of existing cities with nature. Within the framework of this phenomenon, in the study based on qualitative observations in the port city of Iskenderun, the concepts of xeric landscape, sustainable agriculture, stormwater management, wastewater management and green port, which are green infrastructure components, were examined, and it was tried to shed light on the realization of the current and possible expansion situations of the city with the understanding of sustainable urban management.

Doi: 10.24012/dumf.1182834

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Günümüzde insanların kendi ihtiyaçları çerçevesinde yaptıkları kent tasarımları tamamen insan merkezlidir. Bu nedenle yapılan tasarımlarda ağırlık kültürel ve ekonomik açıdan insan yararı gözetilerek yapılmaktadır. Dolayısıyla bu işlemlerin kendisi insan merkezli olduğu için, insan ve özellikle onun ekonomik çıkarları, planlama ve tasarım çözümlerine hakimdir [1]. Yapılacak kent tasarımlarını doğrudan etkileyen çeşitli dinamikler mevcuttur. Dünyanın her yerinde sürekli değişen yeni dinamikler sebebiyle farklı ölçeklerdeki mekânsal birimlerde kontrolsüz göçler gerçekleşmektedir [2]. Ekonomik ve sosyal dinamiklerin etkisiyle gerçekleşen bu göçler kırsal alanlarda büyük ölçümler oluşturmaktadır. Kentlere doğru olan bu göçlerin oluşturduğu kontrolsüz nüfus artışı ekolojik denge üzerinde ciddi baskılar meydana getirmektedir [3]. Kentsel altyapının ani nüfus artışlarına hazırlıksız yakalandığı durumlara bağlı olarak kentlerin ekolojik dengeleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu sebeplerden dolayı kentlerdeki altyapısal problemlerin çözümü sürdürülebilirlik anlayışı çerçevesinde ele alınmaya başlanmıştır [3].

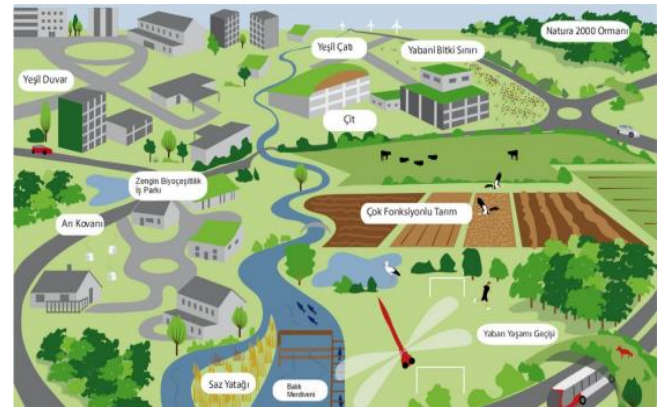
Sürdürülebilirlik kavramı doğa ve insan arasında bir denge oluşturarak mevcut kaynakların gelecek kuşaklara tahrip edilmeden aktarılmasını sağlayan bir anlayıştır. Gelecekte ki dünya nüfusunun dağılımını nüfus projeksiyonu üzerinden değerlendirdiğimizde hesaplamalara göre 2050 yılında dünya nüfusunun yaklaşık %68'inin kentlerde yaşayacağı öngörülmektedir [4]-[5]. Kentlerde meydana gelen düzensiz göçler sebebiyle bölgesel bazı yığılmalar, genellikle iş imkanlarının çeşitlendiği bölgelerde fazladır. Kentsel yığılmalara bağlı olarak gelişen düzensiz mekânların oluşması, arazi kullanımının sağlıksız biçimde artması bu düzensizliğe bir çözüm arayışı olarak; kentsel sürdürülebilirlik kavramını ortaya çıkarmıştır [6]. Ekonomik değerler ile çevresel değerleri bir denge sistemi içerisinde ele alan yaklaşımlar sürdürülebilir kent yönetimi sistemleri olarak bilinmektedir. Kentlerin sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesinde aktif olarak rol alan yaklaşımlardan birisi ise yeşil altyapı anlayışıdır [7].

Yeşil altyapı kavramı ABD'de 2000'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu tanımlamada ekolojik ve kültürel değerler sürdürülebilir bir şekilde ele alınmış ve bu sistem ile hem doğal hem de kültürel kaynaklar yapı ve işlev bakımından birbiri ile bağlantı kurularak oluşturulmaya çalışılmıştır [8]. Yeşil altyapı kavramı üzerine yapılan çeşitli tanımlamalar mevcuttur. 2013'te Avrupa'da yayımlanan raporda kaliteli bir yaşam için temiz gıda, temiz su ve temiz havanın yanında uygun iklimin olduğu, sel riskinin olmadığı uygun rekreasyon alanlarına ihtiyaç olduğunun vurgusu yapılmıştır. Bu durum ekosistemin bize sunduğu hizmetler olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat ekosistemin bize sunduğu bu faydalar hem ücretsizmiş gibi hem de insanlar tarafından sanki hiç bitmeyecekmiş gibi kullanılmaktadır. Raporda doğal sermayenin azaldığına, sürdürülebilirliğin tehlikeye girdiğine ve çevresel şoklar karşısında direncin azaldığına vurgu yapılmıştır. Bu olgu çerçevesinde rapor, yeşil altyapıya yatırım yapmayı doğal sermayeyi korumaya yönelik bir adım olarak tanımlamaktadır. Ayrıca yeşil altyapı stratejik olarak planlanmış doğal ve yarı doğal alanlardan oluşan ve diğer çevresel özelliklere sahip, geniş bir ekosistem hizmetleri yelpazesi sunmak üzere tasarlanmıştır.

ve yönetilen bir ağ olarak tanımlanmıştır. Avrupa Komisyonu Yeşil Altyapı Bildirisi'ne göre ise genel anlamda doğanın kendi çözümleri ile insana yardımcı olma sanatı olarak tarif edilebilir. Diğer bir ifadeyle ekosistemin kendine özgü yapısını koruyan ve ekosistemin kendi yapılarıyla insana fayda dağılayan ağlar olarak da ifade edilebilir [9]-[11]. Yeşil altyapı kavramı bu bağlamda açıklanacak olursa, içerisine doğanın insana sunmuş olduğu tüm imkanlar, genel olarak yeşil peyzaj uygulamaları ve yeşil koridorlar olarak açıklanabilir. Daha spesifik ifade ile göl/göletlerden nehir koridorlarına, park ve bahçelerden doğa rezervlerine, sokak ağaçlarından yeşil çatı ve yeşil duvarlara ve hatta çiftliklere kadar bu kavram genişletilebilir. Özetle yeşil altyapı bölgesel kalkınma, iklim değişikliği, afet risk yönetimi, tarım/ormancılık ve çevre alanlarında önemli bir katkı sağladığı bilindiğinden çeşitli fonlarla (Ortak Tarım Politikası, Uyum Fonu, Avrupa Bölgesel Kalkınma Fonu, Horizon 2020, Avrupa'yı Birleştirme Tesisi, Avrupa Denizcilik ve Balıkçılık Fonu ve Çevre için Finansal Araç) uygun finansman mekanizmaları aracılığıyla finanse edilen projelere entegrasyonunu kolaylaştırmak hedeflenmiştir. Bunun için güvenli data'lara ve bilgi tabanını geliştirip ve yeniliği teşvik etmeye ihtiyaç duyularak Avrupa Birliği çapında finansal desteğe ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır [12].

Yeşil altyapı ekolojik tabanlı olması, pratik ve uygulanabilir olması, yenilikçi olması, multidisipliner olması ve halk sağlığını korunması bakımından pek çok avantaj sunar. Diğer taraftan uygulama esnasında pek çok idari yapının ilgi alanına girdiği için her biri ile koordineli çalışması ve multidisipliner bakış açısında çeşitli meslek gruplarının konuya aynı derece hassasiyet gösterememesi bakımından bazı zorlukları da mevcuttur [13]-[14].

Yeşil altyapı sisteminin bileşenleri arasında birçok farklı uygulamalar bulunmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, yeşil bahçeler, yeşil çatı ve duvarlar, geçirgen kaplamalar ve sürdürülebilir tarımsal uygulamalar, yağmursuyu yönetimi ve sulak alanlar bazı yeşil altyapı çalışmalarına örnek olarak gösterilebilir [15].



Şekil 1. Yeşil Altyapı Sistemi [15].

Genel perspektif ile yapılan değerlendirmeler neticesinde bu çalışmada sürdürülebilir kent yönetimi anlayışını destekleyen yeşil altyapı ana bileşenlerinden kurakçıl peyzaj, sürdürülebilir tarım, yağmursuyu yönetimi ve atıksu yönetimi başlıkları detaylı bir şekilde incelenerek kentlere sağlayacağı faydaları irdelenmiştir.

## Yeşil altyapı bileşenleri

### Kurakçıl peyzaj

Bilindiği üzere küresel ısınma sonucu ortaya çıkan olumsuz etkiler, canlı yaşamının vazgeçilmez temel unsurlarından biri olan su kaynaklarının varlığını riske atmaktadır. Bu nedenle mevcut su kaynaklarının sürdürülebilir çevre yönetimi anlayışı çerçevesinde akılcı bir şekilde yönetilmesi, kullanılması ve korunması gerekmektedir.

Ülkemizde ve dünyada değişen göç dinamiklerine bağlı olarak kentleşme hızında aşırı artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca bu artışa bağlı olarak doğal bir gereksinim olan rekreasyon alanları dediğimiz peyzaj alanlarının yapımı hız kazanmıştır. Bu alanlar suyun yoğun olarak kullanıldığı alanlar olarak göze çarpmaktadır. Küresel ısınma sebebiyle, iklimsel değişkenlerin dinamik yapısında oluşan düzensizlikler yağışların azalması ve kuraklık problemlerinin daha hissedilebilir boyutlara ulaşmasına neden olmuştur. Bu sorunlar kapsamında su sıkıntısının yoğun olarak yaşandığı bölgelerde peyzaj uygulamaları opsiyonel olarak sürdürülebilir ve daha çevreci bir anlayış olarak kurakçıl peyzaj tasarımları yönüne doğru kaymıştır.

Kurakçıl peyzaj, bitkilerin su gereksinimleri dikkate alınarak özellikle kuraklığa dayanımı yüksek türlerin tercih edildiği ve tasarımın yapıldığı bakım maliyetlerinin minimum olduğu sürdürülebilir bir peyzaj tasarımı anlayışıdır. Kurakçıl peyzaj tasarımlarında seçilen bitki türleri yağmursuyu ile yetinebilen ya da çok az su isteyen türler tercih edilmektedir. Bunun yanında bölgenin yerli türlerinin tercih edilmesi hem adaptasyon süresinin kısılmasına hem de ekonomik olarak kazanımların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [16]-[20].

Kurakçıl peyzaj kavramı, tasarımlarında su kullanımını minimize etmeyi amaç edinerek klasik tasarım anlayışlardan farklı olarak “Su Etkin Peyzaj Düzenlemeleri” altında toplanan, “Suyun Akılcı Kullanımı”, “Az Su Kullanımı” ve “Doğal Peyzaj Düzenleme” gibi ekolojik kaygıları gözetilen bir anlayış olarak ortaya çıkmıştır [17], [21].

Kurakçıl peyzaj anlayışı ile diğer klasik tasarım anlayışları kıyaslanacak olursa su kullanımında yaklaşık %20-50 arasında tasarruf sağlandığı ve buna bağlı olarak işletme ve onarım masraflarının ise yarı yarıya azaldığı bildirilmiştir [22]. Ayrıca farklı bir çalışmada kurakçıl peyzaj tasarımı ile bitkisel tasarım çalışması gerçekleştirilmiş ve 1 m<sup>2</sup> alanda yaklaşık 2.271 L su tasarrufunun sağlandığı belirtilmiştir [23].

Kurakçıl peyzaj planlamalarının bazı temel noktaları bulunmaktadır. Bunlar; planlama, bitki türü seçimi, malç uygulaması, çim alan uygulaması, etkili bakım, etkin sulama, toprak hazırlama gibi aşamalardan oluşmaktadır. Bu kapsamda su kullanımının minimize edecek şekilde adımlar atılmaktadır. Özellikle planlama aşamasında iklim koşulları, toprak yapısı, güneşlenme durumu, hidrolojik durumu, hâkim rüzgâr yönü gibi alana ait veriler değerlendirilir. Planlama yapılacak alanın toprak analizi sonucunda toprağa verilmesi gereken toprak iyileştiriciler/düzenleyiciler, yetiştirilecek bitkinin vejetasyon süreçleri göz önünde bulundurulur ve uygulanır. Bitki seçim aşaması da kurakçıl peyzaj uygulamalarında son derece önemlidir. Özellikle iklimsel ve bölgesel adaptasyonun zorluklarından dolayı

yerel türlerin seçilmesi son derece önemlidir. Bakım masrafları ve su ihtiyaçları az olan türler bu aşamada daha fazla kullanılmalıdır. Bilindiği üzere çim alanlar su ihtiyacının maksimum olduğu alanlardır. Bu nedenle kurakçıl peyzaj anlayışında çim alanlar minimum düzeyde tutularak tasarımlar yapılmaktadır. Yine sulama planlaması bu anlayışta çok önemlidir. Seçilen bitkisel tasarım dikkate alınarak en uygun sulama biçiminin planlanması gerekmektedir. Özellikle manuel yöntemler ve uygun olmayan saatlerde yapılan sulamalar su tasarrufu yönünden oldukça dezavantajlıdır. Bir diğer aşama malçlamadır. Bu uygulama ile toprağın nemi korunur ayrıca bitki organik madde bakımından desteklenmiş olur. Bütün bu aşamaların sürdürülebilir olması için en önemli adım olan bakım aşamasının düzenli bir şekilde gerçekleştirilmesi gereklidir. Bakım aşamasında gübreleme, budama, hastalık ve zararlılarla mücadele gibi unsurlar bulunmaktadır [18]-[20].

### Sürdürülebilir tarım

Dünya nüfusunun artışına bağlı olarak tarımsal ürünlere olan ihtiyaç artmıştır. Bu artan ihtiyacı karşılamak ve daha fazla ürün elde etmek amacıyla özellikle kimyasal gübre ve tarım ilaçları kullanımı, daha kısa sürede daha fazla ürün elde etmek amacıyla fazlalaşmıştır. Bu artışın insan sağlığı ve çevresel sistemlere olan olumsuz etkileri ortaya çıkmaya başlayınca yeni tarım sistemleri arayışları ortaya çıkmıştır [24].

Dünyada tarımsal üretim kaynaklı çevresel sorunların çözümüne yönelik arayışlar, çevresel sistemler, insan sağlığı ve doğal kaynaklar arasındaki dengeyi korumayı hedef alan sürdürülebilir tarım sistemlerinin doğmasına sebep olmuştur. Sürdürülebilir tarım, toprak, su, hava ve iklim bileşenleri gibi tarımsal ekosistemin unsurlarına zarar vermeden veya bu zararı en aza indirerek ekosistemin kendini yenilemesine fırsat tanıyan tarımsal teknolojilerin kullanıldığı ve böylece doğal kaynakların korunmasını hedef alan tarımsal sistemler ve uygulamalardan oluşmaktadır [25]. Diğer bir tanımla sürdürülebilir tarım, doğal kaynakları tüketmeksizin ve çevreye zarar vermeden yapılan gıda üretimidir. Sürdürülebilir tarımsal üretimde en önemli unsurlardan birisi arazinin ve coğrafi unsurların çok iyi bilinmesi ve analiz edilmesidir. İklimsel olarak bilinmesi gereken özellikler şunlardır; sıcaklık ölçümleri, nem, rüzgâr hızı, rüzgâr şiddeti ve yönü, yağış miktarı ve yağış şekli, hangi dönemlerde ne kadar sıklıkla don olaylarının yaşandığı gibi temel bilgilerden oluşur. Ayrıca iklimsel özelliklerin yanında toprağın yapısı ve kalitesi, hidrolojik ve hidrojeolojik durum gibi bileşenler fizibilite çalışması sırasında detaylı bir şekilde ele alınmalıdır. Tarımsal sürdürülebilirliği destekleyen uygulamalar bünyesinde koruyucu toprak işleme metotları, bitkisel atıklarından elde edilen kompostların kullanımı, hayvan gübrelerinin kullanılması, zararlılarla mücadelede doğal yöntemlerin kullanılması gibi birçok yöntem bulunmaktadır [26]. Örneğin; toprakta azot fiksasyonu için kimyasal gübre kullanımı dışında azot fikse eden mikroorganizmalar ve baklagil köklerindeki nodüller sayesinde biyolojik azot fiksasyonu yapılabilmektedir [27]. Ayrıca tarımsal sulama yapılırken nitratla kirlenmiş yeraltı suyu kullanım çalışmaları da mevcuttur [28].

## Yağmursuyu yönetimi

Kentleşme hızındaki yoğun artış sebebiyle yaşamsal faaliyetlerin sürekliliğinde temel bir doğal kaynak olan suyun korunması ve etkin bir şekilde kullanılması, şehirlerde hayati bir konu haline dönüşmüştür. Kentler, kırsal alanlara oranla suyun infiltrasyonunu azaltan daha büyük miktarda geçirimsiz yüzeylere sahiptir. Bu sebeple yeraltı suyunun ve toprağın beslenmesi oldukça azdır [29]-[30]. Oluşan yağışlar yüzeysel akışa geçtiğinde beraberinde çeşitli kirleticileri sürükleyerek alıcı ortamlara taşımaktadır. Mevcut şehircilik anlayışı ile yapılmış olan kentsel tasarımlar sebebiyle suyun hidrolojik döngüsünün ya tamamlanmadığı ya da engellendiği görülmektedir. Hidrolojik döngü içerisinde hareket etmesi gereken yağışlar, çatılardan oluklara, oradan kanalizasyon sistemine ve beton kanallara, daha sonra ise alıcı ortamın çeşidine göre nehir, göl, deniz gibi su havzalarına ulaşmaktadır. Suyun toprak tarafından filtrelenerek yeraltı suyunun beslenmesi ve buharlaşarak atmosfere geri dönmesi aşamaları atlanarak hidrolojik döngüde yeri olmayan sel vb. taşkımlarla artık daha çok karşılaşılmaktadır [30].

Geleneksel yağmur suyu yönetim anlayışında mazgallar, borular, muayene bacaları gibi sistemler hala şehirlerde kullanılmaktadır. Mevcut durumda hala kullanılan bu sistemler evapotranspirasyon, infiltrasyon ya da yüzeysel akış gibi hidrolojik süreçlere dayanmamakta ya da bu doğal süreçlere benzemek gibi bir kaygı taşımamaktadırlar [30]-[31].

Ancak son yıllarda küresel ısınma ile birlikte ortaya çıkan su sıkıntısı sebebiyle geleneksel yağmursuyu yönetim şekilleri yerine alternatif su yönetim şekilleri aranmaya başlanmıştır. Bunun neticesinde, farklı sürdürülebilir kentsel yağmur suyu yönetim anlayışları ortaya çıkmış, sürdürülebilir kent yönetimi ve yeşil altyapı kavramlarının içselleştirilmesi sonucu değişik uygulamalar denemeye başlanmıştır. Bu anlayış çerçevesinde yağmur bahçeleri, yeşil çatı sistemleri, su toplama hendekleri gibi yaklaşımlar karşımıza çıkmaktadır.

### Yağmur hendeği (bitkili su hendeği)

Bitkili su hendeği, zeminde bitki örtüsü ve kenarlarda oluşturulan eğim ile suyun cazibeli bir şekilde yüzeysel akışa geçmesini sağlayan açık ve sığ kanallardır (Şekil 2). Akışa geçen su yavaş bir şekilde ilerlediğinden hendekteki bitkiler sayesinde biyolojik filtrasyon ve ağır metal gideriminin de sağlandığı bilinmektedir [32]. Bu uygulamalar genel olarak suyun yüzeysel akış hızını ve miktarını azaltarak erozyonu önlemeye yardımcı olur.



Şekil 2. Bitkili su hendeği [33].

### Geçirimli kaplama

Geçirimli kaplamalar, yağışları bünyesine alarak toprak tabakasına iletimini sağlayan ve bu sayede yeraltı suyunun beslenmesini sağlayan kaplamalardır (Şekil 3). Bunların yüzeylerinde çim ve çakıl veya gözenekli beton ve asfalt olan türleri bulunmaktadır [34]. Bu kaplamalar parklarda, otoparklarda, yürüyüş yolları ve meydanlarda kullanılmaktadır [35].



Şekil 3. Geçirimli kaplama [36].

### Yağmur bahçesi

Yağmur bahçeleri, çatılardan, karayollarından, yeşil alanlardan gelen suyun tutulması için tasarlanmış, yağışla birlikte direk olarak gelen suların yönlendirildiği, içerisinde bitkilerin bulunduğu, sığ çukur alanlara denilmektedir (Şekil 4). Kırsal alanlarda kendiliğinden ya da yapay olarak oluşturulan sulak alanların bir benzeridir [37].

Yağmur sularının kanalizasyon sistemlerine verilmemesi ile atıksu arıtma tesisine gelen su yükü de azalmış olacağından hem enerji maliyetlerinde azalmaya katkı sağlar hem de atıksu arıtma tesisine gelen ani debi yükselişlerinde çıkış suyu kalitesinin düşmesi engellenmiş olur. Dahası estetik, biyoçeşitlilik ve yaban hayatı açısından pek çok olumlu fayda sağlamaktadır [38].



Şekil 4. Yağmur bahçesi [39].

### Yeşil çatı

Mevcut çatı sistemi üzerine teşkil edilen yeşil çatılar, düz ya da eğimli olarak inşa edilen üzerinde, bitki örtüsü, toprak, drenaj ve su geçirmeyen bir katman bulunan sistemlerdir [40]. Bu sistemler (Şekil 5) kentlerde ısı adası etkisini azaltıcı özelliğe sahiptirler. Binalarda ısı yalıtımı etkisi oluşturarak enerji verimliliğini artırırlar. Bunun yanında yağış yeşil çatılara düştüğünde, burada bulunan bitkiler tarafından kullanıldığı için daha az su altyapı sistemine gider [41].



Şekil 5. Yeşil çatı [42].

### Atıksu yönetimi

Eski çağlarda insanlar, sosyal yönden günümüz insanlığı gibi toplu ve yağın halinde yaşamadığı için oluşturdukları atıksular alıcı ortamda (toprak ya da su) rahatlıkla bertaraf edilebiliyordu. Topluluk halinde yaşama neticesinde oluşan atıksuların sağlık açısından tehdit boyutuna yaklaştığında kanalizasyon sistemi insanlığın gündemine girmeye başladı. Hızlı nüfus artışı ve kentleşme ile birlikte sanitasyon terimi de kuvvetlenmeye başladı ve 1900'lü yılların başında kanalizasyon sularının bertarafı gündeme geldi. Kanalizasyon sularının arıtımı ikinci dünya savaşı ile birlikte zarara uğrasa da 1950'li yıllar itibarıyla su kalitesi standartları konuları gündeme gelmeye başladı. 1970'li yıllarda gaz kromatografisi ve atomik absorpsiyon spektrofotometresinin ticari olarak kullanıma başlanması ile birlikte çevresel kontaminasyon olgusu hayatımıza tamamen yerleşmiş oldu [43].

Oluşan atıksuların insan ve çevre sağlığı açısından tehdit olduğu algısı sonucu bu atıksular çeşitli şekilde tasfiye (uzaklaştırılma/bertaraf) edilmeye başlandı. Tasfiye tekniklerinin geçmişine bakılacak olursa 1890'lı yıllarda septik tanklar, 1900'lerde imhoff tankları ve nihayet karbon giderimi için Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) tabiri ile Akif Çamur terimi ortaya çıkarak günümüz anlamıyla arıtma başlamış oldu. 1950'li yıllar itibarıyla Yapay Sulak Alan ve Döner Biyolojik Reaktörler ile arıtma yapıldı. 1960'lı yıllar civarında karbonun yanında azot ve fosfor elementlerinin de çevresel açıdan risk olduğu görülünce Nitrifikasyon-Denitrifikasyon Prosesleri ile Fosfor giderim prosesleri ve Anaerobik reaktörler ile arıtım yapılmaya başlandı. Yakın geçmişte (1980'li yıllar) çevresel hassasiyetler arttıkça ileri arıtım ihtiyacı doğdu ve artık membranların atıksu arıtımında kullanımı başladı ve nihayet günümüzde bu durum mikrokirleticiler boyutuna taşınarak alıcı ortamın korunması sağlanmaya başlandı [43]. İnsan ve çevre sağlığının korunması için yapılan bu tasfiye işlemleri kısaca detaylandırılacak olursa, yerçekiminin etkisiyle ağır maddelerin (katıların) atıksudan uzaklaştırılması işlemine Primary Treatment (Birincil Arıtım), karbonlu maddelerin mikroorganizmalar tarafından karbondioksit, su ve yeni hücre oluşumu için enerji üretimine dönüştürüldüğü sistemlere Biyofilm ya da Askıda büyüyen (Aktif Çamur) sisteminin kullanımına Secondary Treatment (İkincil Arıtım), nihayet alıcı ortamdaki azot ve fosforun sebep olduğu ötrofikasyon sorununu engellemek için geliştirilen biyolojik azot-fosfor giderim sistemlerine Advanced Treatment (İleri Arıtım) denilir [44]. Teknolojik gelişmeleri takiben 1960'lı yılların sonunda çökeltim havuzunun yerine ultrafiltrasyon membranların kullanımı denendi ve 1970 ve

1980'li yıllarda ful ölçekli aktif çamur prosesinde membranların kullanımı başladı. Günümüzde çıkış suyu kalitesini artırmak için pek tip membran atıksu arıtımında yerini almaktadır [43].

Günümüzde klasik ve modifiye olmakla birlikte pilot ve gerçek ölçekte evsel ya da endüstriyel tipte atıksu arıtım çalışmaları mevcuttur [45]- [48]. Klasik atıksu arıtımının yanında doğanın özümleme kapasitesinin taklit edildiği yapay sulak alan sistemi aslında doğal sulak alanların çeşitli işlemler ile kontrollü hale getirilmiş halidir. Doğal sulak alanlara göre optimum su dağıtımının yapılabildiği, bitkilerin düzenli aralıklarla ekiminin yapıldığı ve yer altı sızıntılarının kontrol altında tutulabilmesi vs. gibi birçok etkenin kontrol altına alınmış bir sistemdir. Genel bir tanımlama yapmak gerekirse yapay sulak alanlar, kontrollü bir şekilde dolgunun yapıldığı, mevsim şartlarına uyumlu bir bitki grubunun bulunduğu, bunun yanında çok çeşitli mikroorganizma ve omurgasızların doğal olarak yaşadığı kontrollü doğal havuzlar olarak tanımlanabilir [49]. Bu sistem ile atıksuda bulunan kirleticiler (AKM, organik madde, azot, fosfor, toksik ve iz elementler, ağır metaller ve patojenler) çeşitli adsorpsiyon, sedimentasyon, filtrasyon, mineralizasyon ve fitoremediasyon gibi fiziksel, kimyasal ya da biyolojik yöntemler ile form değiştirerek atıksu bünyesinden kısmen ya da tamamen ayrılmaktadır [50]- [51]. Bu sistem kendi kendini yenileyebilen, kurulum ve işletme maliyeti oldukça az olan, ekipman ve personel sayısı az ekonomik bir prodestir. Yapay sulak alanlar klasik sistemlerle nazaran daha ucuz sistemler olmakla birlikte çamur çıkarmayan sistemlerdir. Mevsimin uygun olduğu kırsal alanlarda kullanılan olanakları oldukça yüksektir [52]- [53]. Günümüzde uygulanan yapay sulak alan teknolojisi genelde "Akım Düzeni" ve "Makrofit türü"ne göre 2 ana başlık altına toplanır. Genellikle akım düzenine göre inşa edilen bu sistemlerde de "Serbest yüzey akışlı" ya da "Yüzey altı akışlı" olacak şekilde imal edilir. Birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarının olduğu bu sistemlerde genellikle mevsim şartları dikkate alınarak seçim yapılır [54].

Dünyada bu teknoloji neredeyse 50 yıldır ülkemizde ise yaklaşık 25 yıldır kullanılmaktadır. Pek çok evsel ve endüstriyel atıksuların yanında, cam sanayi atıksuları, pirinç endüstrisi, kumaş boyama endüstrisi, tarımsal ürünlerin üretimi endüstrisi gibi çok çeşitli atıksuların da arıtımı mümkündür [55]- [56]. Ülkemizde laboratuvar ölçekli çalışmaların yanında pilot ve gerçek ölçekte çalışmalar mevcuttur [55]. Denizli ilinde 630 kişilik bir yerleşim yerinde uygulanan yapay sulak alan teknolojisi sayesinde KOİ, AKM, BOİ<sub>5</sub> ve pH parametrelerinde Su Kirliliği kontrol Yönetmeliği'nde belirtilen deşarj limitlerinin rahatlıkla ulaşılmıştır [53]. Yine Sakarya ilinde evsel nitelikli atıksular bu teknoloji ile arıtılarak AKM, KOİ, BOİ, NH<sub>4</sub>-N ve NO<sub>3</sub>-N parametrelerinin gideriminde yeterli verime ulaşmışlardır [57].

Yapay sulak alan teknolojisi ana etkeni bitkisel materyallerdir. Makrofitler olarak da adlandırılan bu bitkiler gelişim için fotosentez yaparlar ve bu bitkiler karbon kaynağı olarak CO<sub>2</sub> kullanırlar. Yaprak, kök veya toprak canlılarının termokimyasal konversiyonu sayesinde azotlu bileşiklerin de tutulmasıyla sera gazı emisyonlarının azalmasına katkı sunarlar. Ayrıca vahşi yaşam hayvanları, kuşlar, omurgasızlar ve biyoçeşitliliğe de çok ciddi katkı

sağlamaktadır. Bu haliyle yapay sulak alanlar sürdürülebilir kent yönetimi anlayışına katkı sunan yeşil altyapı kavramı içerisinde yerini almıştır [56]- [58].

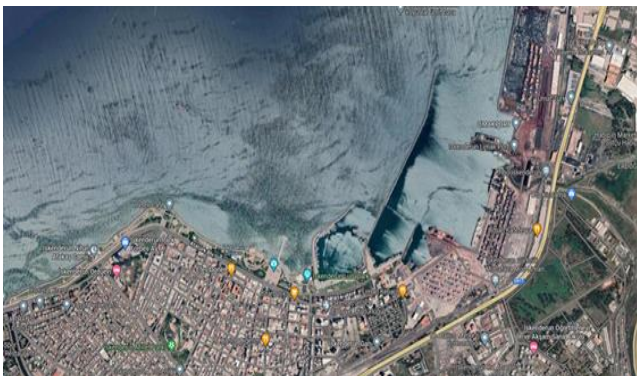
### Yeşil limanlar

Deniz ve kara ulaştırma sistemlerinin kombinasyonu şeklinde hizmet veren limanlar hem ulusal hem de uluslararası taşımacılık ve ticaretin en önemli bileşenlerinden biridir. Bunun yanında yerel ve global ekonomilerin yatırım ve kazanç kapısı olarak göze çarpmaktadır. Yüksek yoğunluklu ekonomik hareketlerin olduğu bu limanlarda zaman zaman iletişim kanallarına da yansıyan deniz taşımacılığı kaynaklı çevresel tahribat yaratan kazalar olmuştur [59]. Bu sebeple olası çevre sorunlarına karşı son yıllarda sürdürülebilir bir sistem yaratma endişesi tüm sektörlerde olduğu gibi deniz taşımacılığı sektöründe de önem kazanmıştır [60]. Sürdürülebilirlik kavramı kapsamında yönetilen limanlarda Yeşil liman ya da Ekoliman (ekolojik liman) tanımları karşımıza çıkmaktadır. Yeşil liman olarak da bilinen Ekoliman (ekolojik liman) kavramı, yalnızca çevresel değerleri değil, bunun yanında ekonomik çıkarları da artıran, bu iki değer arasında denge kurarak büyümeyi sağlayan sürdürülebilir çevre dostu bir liman yönetimi anlayışıdır [61]. Gerek ülkemizde gerekse yurtdışında pek çok ülkede yeşil liman uygulamaları mevcuttur. Türkiye’de Aksa limanı, Bodrum Kruvaziyer Limanı, Petkim Limanı, Borusan Limanı, Ege Port Limanı ve Limak İskenderun Limanı Yeşil Liman kategorisinde faaliyet gösteren limanlar arasındadır [62]. Bunun yanında Avrupa Limanları Organizasyonu ESPO “European Sea Ports Organisation” tarafından Lloyd’s Register işbirliği ile verilen, Avrupa’nın en prestijli Çevre Yönetim Sistemi Sertifikası PERS “The Port Environmental Review System (Liman Çevresel İnceleme Sistemi)” Türkiye’de ilk defa Asyaport’a verildi.

### Materyal ve yöntem

#### Materyal

İskenderun kenti (Şekil 6) yaklaşık 247 km<sup>2</sup> yüzölçümüne sahip Türkiye’nin güneyinde yer alan Hatay ilinin 15 ilçesi arasındadır. Ticaretin yoğun olarak yapıldığı limanlardan birine sahip olan ilçe, bulunduğu coğrafi konum itibarıyla turizm açısından da önemli bir konumdadır. İlçe yaklaşık 30 km’lik kıyı hattına sahiptir. Kent batıda Akdeniz, doğuda ise yüksekliği 2262 metre yüksekliğe uzanan Amanos Dağları arasında kalan alanda gelişmiş, yerleşim alanları ise liman çevresinde yoğunlaşmıştır. İlçenin hakim bitki örtüsü makiler ve ormanlardır [63].



Şekil 6. Çalışma alanı [64].

### Yöntem

Çalışma İskenderun kent merkezinde yer alan yeşil altyapı unsurlarını içeren alanların incelenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Yöntem olarak yerinde gözlem tekniği kullanılmıştır. İncelenen alanlar fotoğraflanarak yeşil altyapı unsurları çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler neticesinde çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

### Bulgular ve tartışma

#### İskenderun limanı

İskenderun Limanı (Şekil 7), İskenderun körfezi ve Akdeniz’in kuzeydoğusunda 1 km<sup>2</sup>’lik bir alan üzerinde kurulmuş Ortadoğu ülkelerine olan aktarma trafiğine olduğu kadar, Güney ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerine de hizmet veren bir limandır. 2019 yılında Altıntel Limanı, Hopaport, Limaş Mardaş Limanı ile birlikte Limak İskenderun Limanı Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yeşil-Eko Liman gerekliliklerini tamamlamış ve sertifikalandırılmıştır [65]. Bu kapsamda İskenderun Limanında atık yönetim sistemleri, yenilenebilir enerji kullanımı, gürültü denetimi, atıksu ve deniz kirliliği yönetimi, hava kirliliği önleme ve toz azaltımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin fosil yakıtlı vinçlerden vazgeçilip, elektrikli vinçler kullanılarak emisyon değerleri oldukça azaltılmıştır. Şirketin sürdürülebilirlik hedefleri arasında 2031 yılına kadar dizel motorlu araçlarının hepsini elektrikli araçlara çevirmek bulunmaktadır. Bununla beraber dış aydınlatmada tamamen led tipi enerji tasarruflu sistemler kullanılmaya başlanmıştır [66].



Şekil 7. Limak İskenderun Limanı [67].

#### Su ve Atıksu Tesisleri

Su ve atıksu tesisleri kentlerde yeşil altyapı unsurlarını oluşturan en önemli bileşenlerdendir. 2019 yılı verilerine göre İskenderun ilçesi su temini bakımından incelendiğinde emniyetli yeraltı suyu rezervi 19,70 hm<sup>3</sup>/yıl’dır. İskenderun ve İskenderun-Payas bölgesinden yıllık çekilen su miktarı ise 67.468.341 m<sup>3</sup>/yıl ve kullanma belgeli kuyu adedi ise 957’dir. İlçe içme ve kullanma suyu ihtiyacını kuyular ve yüzeysel sularla karşılamaktadır. İçme ve kullanma suyu amaçlı olarak yüzey suyu kaynağı Ağpınar (Körpınar) köyünden 3,110 hm<sup>3</sup>/yıl, Akçay’dan 7,776 hm<sup>3</sup>/yıl, endüstriyel proses suyu kullanımı olarak Mersin çayı ve Derebani deresinden İskenderun kenti ve sanayi tesisleri için çekilen su miktarı 77,57 hm<sup>3</sup>/yıl’dır. Ayrıca içme suyu olarak yeraltı kuyularından (İskenderun, Kaledibi, Değirmendere ve Suçikağı kuyuları) temin edilen su miktarı ise 4.717.220 m<sup>3</sup>/yıl’dır [68].

Atıksu arıtma tesisleri incelendiğinde ilçede mevcut kapasitesi 86.400 m<sup>3</sup>/gün olan ve yaklaşık 438.000 kişilik nüfusa hizmet eden biyolojik atıksu arıtma tesisi, ayrıca debisi 4.354 m<sup>3</sup>/gün olan ve yaklaşık 33.000 kişilik nüfusa hizmet eden 2 ayrı biyolojik atıksu arıtma tesisi mevcuttur. Bunun yanında sanayi bazlı atıksu arıtma tesislerine bakıldığında 10.000 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli kimyasal olarak çalışan endüstriyel bir atıksu arıtma tesisi mevcuttur [69].

### İskenderun Millet Parkı ve İskenderun Sahili

İskenderun Millet Parkı yaklaşık 50 dönümlük bir alan üzerine inşa edilmiştir. İskenderun Belediyesi tarafından 2019 yılında tamamlanmış olan projenin içerisinde yürüyüş parkuru, koşu yolu, bisiklet yolu, amfi tiyatro, yazlık sinema, kermes alanı, 750 araçlık otopark, basketbol, voleybol sahası ve biyolojik bir gölet bulunmaktadır.

Kentin dinamiklerinden olan sahil şeridi üzerinde spor tesisleri, çocuk oyun alanları, çim alanlar gibi yeşil altyapı bileşenleri kullanılmıştır. Sahil şeridinde bulunan açık yeşil alan koridoru, ilçede yaşayanlar için önemli bir rekreasyon alanıdır [70].

Kentin yeşil altyapı bakımından lokomotif olan sahil ve millet parkı (Şekil 8) kent de planlanan diğer projelere öncülük etmektedir.



Şekil 8. İskenderun Sahili ve Millet Parkı [70].

### Sonuç

Çalışma kapsamında yeşil altyapı unsurlarını içeren İskenderun Limanı, su ve atıksu tesisleri, İskenderun Millet Parkı ve İskenderun Sahili incelenmiştir. Genel perspektifte yapılan değerlendirmede su temininin yüzeysel sulardan ve kuyulardan yapıldığı görülmektedir. Bazı bölgelerde su temini kuyulardan sağlandığı için bölgede yeni kuyu açmalarının kontrollü bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ayrıca ilçe göç alan bir yapıya sahip olduğu için nüfus artışına bağlı olarak su yönetimi stratejik planının revize edilmesi gerekmektedir.

İskenderun Millet Parkı ve İskenderun Sahili yapısal ve bitkisel tasarım açısından değerlendirildiğinde bölgede yapılan bitkisel tasarımlarda yoğun su istemeyen çim ve bitkilerinin daha fazla kullanılmasına ağırlık verilmelidir.

Sonuç olarak, dünya üzerinde farklı dinamiklere (gıda krizi, küresel ısınma, afetler, uluslararası gelişmeler vs.) bağlı olarak yaşanan kontrolsüz göçler gerçekleşmeye devam etmektedir ve edecektir. Bu sebeple özellikle yerel yönetimlerin, kentlerin altyapılarını bu göçleri karşılayacak şekilde güçlendirmeleri gerekmektedir. Bu noktada öncelikle planlama aşamasında gerçekleştirilmesi düşünülen projelerin sürdürülebilir olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Planlanan tasarımlarda çevresel değerler ile ekonomik değerler arasında bir denge oluşturulursa şehrin

dinamizmine katkı sunacak projeler ortaya çıkabilir. Küresel ısınmanın etkilerini daha yakından hissettiğimiz bu günlerde tasarımcıların tasarım yaparken iklimsel unsurlara karşı daha hassas davranmaları gerekmektedir. Bu aşamada sürdürülebilir kent yönetimi anlayışı çerçevesinde yapılacak tasarımlarda yeşil altyapı anlayışı birçok temel probleme çözüm üretebilecek potansiyele sahip bir anlayış olarak göze çarpmaktadır. Özellikle kentlerde yapılacak yeşil altyapı uygulamalarında, kurakçıl peyzaj çalışmaları, sürdürülebilir tarım anlayışı ile yapılan üretimler, yağmursuyu yönetimi ve sürdürülebilir arıtma yöntemlerinin sürdürülebilir kent yönetiminde aktif bir rol oynamasının ekonomik, ekolojik, sağlıklı ve sürdürülebilir bir çevre oluşturulmasında avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

### 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 Katkıları

Yazarlar makaleye eşit oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

### Teşekkür

İskenderun Belediyesi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Hatay İl Müdürlüğü, Hatay Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

**Kaynaklar**

- [1] Austin G. "Green Infrastructure for landscape planning: Integrating human and natural systems", 1nd ed. New York: Taylor and Francis Group; 2014.
- [2] Turut H., Özgür EM. "Bir kente göçün hikâyesi: süreçler, bütünleşme ve aidiyet" Coğrafi Bilimler Dergisi 2018; 16, 153–180.
- [3] Çatalbaş F. "Yozgat şehir merkezinin başlıca kentleşme sorunları ve çözüm önerileri" Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2016; 32(1) 1–10.
- [4] Kaylı A., Gölbeçer AG. "Yeşil altyapı ve yeşil bina bileşeni olarak kurakçıl peyzaj uygulamaları" Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2020; 57, 303–311.
- [5] UNWPP. "World population prospects: department of economic and social affairs Newyork: United Nations; 2019".
- [6] Erdoğan G., Öztürk B. "Sürdürülebilir kentleşme: dokuma kenti Buldan örneği" Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi 2019; 4, 51–68.
- [7] Yılmaz FH. "Sürdürülebilir çevre İçin yeşil altyapı: Ermenek özelinde bir değerlendirme" Academia Ermenek Araştırmaları 2020; 2, 325–333.
- [8] Semiz M. "Yeşil altyapı sistemleri ve kent sürdürülebilirliği ilişkisi" Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi 2016.
- [9] Benedict M.A., McMahon E.T. "Green infrastructure: smart conservation for the 21st century "Renewable Resources Journal 2002; 20, 12–17.
- [10] Günes M., Şahin Ş. "Yeşil altyapı ve kent kimliği ilişkisi: Ankara kent merkezi örneği" I. Ulusal Ankara Üniversitesi Peyzaj Mimarlığı Kongresi, 15-17 Ekim 2015, sayfa no:445-454, Ankara.
- [11] Hepcan CÇ., Hepcan Ş. "Kentsel yeşil altyapı analizi: Bornova örneği" Mediterranean Agricultural Sciences 2018; 31, 37–43.
- [12] European Commission, "The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions, Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital EU. [https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0014.03/DOC\\_1&format=PDF](https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0014.03/DOC_1&format=PDF). Erişim Tarihi :07 Mayıs 2021.
- [13] Kaplan A. "Planlama ve tasarımda yeni anlayışlar ve pratikler: yeşil altyapı peyzaj bağlamında şehircilik" Peyzaj Mimarlığı Dergisi 2013, 23–30.
- [14] Aslan B.G., Yazıcı B. "Yeşil altyapı sistemlerinde mevcut uygulamalar", Ziraat Mühendisliği 2016; 363, 31–37.
- [15] Özmen B. 2020. "Nevşehir kent peyzajının yeşil altyapı yaklaşımı ile değerlendirilmesi" Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, Yüksek Lisans Tezi 2020.
- [16] Atik M., Karagüzel O. "Peyzaj mimarlığı uygulamalarında su tasarrufu olanakları ve süs bitkisi olarak doğal türlerin kullanım önceliği", Tarımın Sesi TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası Antalya Şubesi Yayını 2007; 15, 9–12.
- [17] Barış M.E. "Kurakçıl peyzaj", Bilim Teknik Dergisi 2007; 478(1): 22-27.
- [18] Bayramoğlu E. "Sürdürülebilir peyzaj düzenleme yaklaşımı: KTÜ Kanuni Kampüsü'nün xeriscape açısından değerlendirilmesi", Artvin Coruh University Journal of Forestry Faculty 2016; 17, 119–127.
- [19] Çorbacı ÖL., Özyavuz M., Yazgan ME. "Water-wise in landscape architecture: xeriscape "TABAD, Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi 2011; 4, 25–31.
- [20] Çakar H., Saraçoğlu Ö., Akat H. "Xeriscape yaklaşımı ile kurak ortamda sürdürülebilir peyzaj: Ege Üniversitesi Bayındır MYO bahçesi örneği" ISUEP2018 Uluslararası Kentleşme ve Çevre Sorunları Sempozyumu: Değişim/Dönüşüm/Özgünlük, 18-20 Kasım 2018, sayfa no:28-30, Eskişehir.
- [21] Weinstein G. Xeriscape Handbook: "A how-to guide to natural, resource-wise gardening" 1th ed. Colorado: Fulcrum Publishing; 1999.
- [22] Taner TM. "Peyzaj düzenlemesinde suyun etkin kullanımı: kurakçıl peyzaj" Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Yüksek Lisans Tezi 2010.
- [23] Sovocool KA., Morgan M. "Xeriscape conversion study final report "Las Vegas: Southern Nevada Water Authority; 2005.
- [24] Eryılmaz GA., Kiliç O. Boz İ. "Türkiye'de organik tarım ve iyi tarım uygulamalarının ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi" Yüzüncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences 2019; 29, 352–361.
- [25] Çeker A. "Sürdürülebilir tarım ve Türkiye açısından bir değerlendirme" Turkish Studies (Elektronik) 2016, 11, 809–836.
- [26] Çukur T., Işın F. İzmir ili Torbalı ilçesinde sanayi domatesi üreticilerinin sürdürülebilir tarım uygulamaları" Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2018; 45(1), 27-36.
- [27] Uyanık M., Afshar K., Rezaeieh P., Delen Y., Gürbüz B. "Baklagillerde bakteri aşılama ve azot fiksasyonu "Ziraat Mühendisliği 2011; 357, 8–12
- [28] Hatipoğlu G., Kurt Z. "Sulamada nitratla kirlenmiş yeraltısuyu kullanımının modellenmesi" Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 26, 468–480.
- [29] Vanwoert ND., Rowe DB., Andresen JA., Rugh CL., Xiao L. "Watering regime and green roof substrate design affect sedum plant growth "Hort Science 2005; 40(3), 659-664.
- [30] Ekşi M., Yılmaz M., Özden Ö. "Yağmur bahçelerinin nicel değerlendirilmesi: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi örneği "Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2016; 31, 1113–1123.



- [31] Calkins M. "The sustainable sites handbook: A complete guide to the principles, strategies, and best practices for sustainable landscapes" 1nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2012.
- [32] Sadeghinazhad S. "Low impact development (LID) practices in flood control of urban areas using SWMM storm water management model" İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi 2019.
- [33] Portland Oreon, "Stormwater management manual oreon" <https://www.portlandoregon.gov/bes/64040>. Erişim Tarihi: 18 Ocak 2022.
- [34] Demir D. "Konvansiyonel yağmursuyu yönetim sistemleri ile sürdürülebilir yağmursuyu yönetim sistemlerinin karşılaştırılması: İTÜ ayazağa yerleşkesi örneği" İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi 2012.
- [35] Dereli CK., Çay RD. "Sürdürülebilir yağmur suyu yönetimi kapsamında yeşil altyapı sistemlerinin değerlendirilmesi: Edirne ili örneği "Kent Akademisi 2020; 13, 668–687.
- [36] Hepcan ÇC. "Kentlerde iklim değişikliği ile mücadele için yeşil altyapı çözümleri" T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara. <https://www.iklimin.org/moduller/kentmodulu-yesilaltyapı.pdf>. Erişim Tarihi: 01.02.2022.
- [37] Müftüoğlu V., Perçin H. "Sürdürülebilir kentsel yağmur suyu yönetimi kapsamında yağmur bahçesi "İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi 2015; 5, 27–37.
- [38] Uğur Ü., Akyüz D. "Yeşil altyapı uygulamaları kapsamında yağmur hendeklerinin önemi ve sürdürülebilir kent anlayışı ile değerlendirilmesi" İklim Değişikliği ve Çevre 2018; 3, 55–63.
- [39] EPA, "United States Environmental Protection Agency, Soak Up the Rain: Rain Gardens "USA. <https://www.epa.gov/soakuptherain#:~:text=Soak%20Up%20the%20Rain%20is,infrastructure%20and%20low%20impact%20development>. Erişim Tarihi: 30 Ocak 2022.
- [40] Aras B.B. "Kentsel sürdürülebilirlik kapsamında yeşil çatı uygulamaları", MANAS Journal of Social Studies 2019; 8, 469–504.
- [41] Doğan S., Türk MB., Doğan SD. "Kent yaşamına yeşil dokunuş-yaşayan çatılar ve biyolojik çeşitlilik" 1 Mayıs Sosyal Politikalar ve Bilimsel Araştırmalar Kongresi. 01-03 Mayıs 2019, sayfa no:338-347, Ankara.
- [42] Külekçi EA. "Geçmişten günümüze yeşil çatı sistemleri ve yeşil çatılarda kalite standartlarının belirlenmesine yönelik bir araştırma "ATA Planlama ve Tasarım Dergisi 2017; 1, 35–53.
- [43] Lofrano G., Brown J. "Wastewater management through the ages: A history of Mankind "Science of The Total Environment 2020; 408, 5254–5264.
- [44] Metcalf L., Eddy HP. "Wastewater engineering treatment and reuse, 4.nd ed. NewYork: McGraw-Hill; 2008.
- [45] Büyükkamaci N. "Yan akımlı anaerobik membran biyoreaktör veriminin araştırılması: Sentetik atıksu ve alkollü içki sanayi atıksuyu" Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2016; 22, 178–182.
- [46] Özkan O., Uyanık İ., Rençber MM., Oğuz M., Şahin U., Koyuncu M. "Organize sanayi bölgesi atıksularının membran biyoreaktörlerle arıtılması: KOSB için ilk sonuçlar" Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017; 23, 1059–1063.
- [47] Gülhan H., Dereli RK., Özgün H., Erşahin ME., Öztürk I. "İleri biyolojik atıksu arıtma tesislerinde işletme parametrelerinin doğrudan sera gazı emisyon miktarı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi "Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 24, 1117–1124.
- [48] Güner ED. "Biyolojik atıksu arıtma tesisi çevresel risk analizi" Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 24, 476–480.
- [49] Temel FA. "Endüstriyel atıksuların arıtımında yapay sulak alanların kullanımı" Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi 2017; 8, 213–226.
- [50] Ran N., Agam., M, Oron G. "A pilot study of constructed wetlands using duckweed (Lemna gibba L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel "Water Research 2004; 38, 2241–2248.
- [51] Stefanakis AI. "The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management "Sustainability 2019; 11(24), 6981.
- [52] Tuncsiper B., Akca L. "Pilot ölçekli bir yapay sulakalan sisteminin arıtma performansının incelenmesi "itüdergisi/d mühendislik 2006; 5, 13–22.
- [53] Göçmez S., Güngör M., Akyürek A., Şenyur M., Öztürk A., Karabuğa MÇ. "Denizli ilinde yapay sulak alanların revizyonu: Bozkurt-Alikurt yapay sulak alan örneği" International Symposium on Urban Water and Wastewater Management, 25-27 Kasım 2018, sayfa no:25-27, Denizli.
- [54] Yıldırım M. "Atıksu arıtma sisteminin seçiminde karar destek sistemleri ve hayat boyu değerlendirme yaklaşımlarının kullanılması" Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, Doktora Tezi 2015.
- [55] Gunes K., Masi F., Ayaz S., Tuncsiper B., Besiktas M. "Domestic wastewater and surface runoff treatment implementations by constructed wetlands for Turkey: 25 years of experience" Ecological Engineering 2021; 170, 106369.
- [56] Vymazal J., Zhao Y., Mander Ü. "Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: a review "Ecological Engineering 2002; 169, 106318.
- [57] Yetik S. "Atıksuların yapay sulak alanlarda arıtımının incelenmesi "Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Yüksek Lisans Tezi 2008.

- [58] Mander Ü., Maddison M., Soosaar K., Koger H., Teemusk A., Truu J., Well R., Sebilo M. "The impact of a pulsing water table on wastewater purification and greenhouse gas emission in a horizontal subsurface flow constructed wetland" *Ecological Engineering* 2015; 80, 69–78.
- [59] Walker TR., Adebambo O., Feijoo MCDA., Elhaimer E., Hossain T., Edwards SJ., Morrison CE., Romo J., Sharma N., Taylor S., Zomorodi S. "Environmental effects of marine transportation. world seas "An Environmental Evaluation 2019: 505-530.
- [60] Arslan, O. ve Solmaz, M. S. "Gemi işletmelerinde sürdürülebilir insan kaynakları üzerine bir araştırma". *Proceedings of the 2nd International Symposium on Mutidisciplinary Academic Studies*, 603-614, Kasım 2018, İstanbul.
- [61] Anastasopoulos A., Kolios S., Styios, C. "How will greek ports become green ports", *Geo-Eco-Marina* 2011; 17, 73-80.
- [62] Alpınak S., Yorulmaz M. "Limanlarımızda sürdürülebilir çevre yönetimi: yeşil liman kavramı", VI. Yıldız Uluslararası Sosyal Bilimler Kongresi, 12-13 Aralık 2019, sayfa no:95-107, İstanbul.
- [63] Ökten SSÖ. "Kent parklarının biyofilik tasarım kriterlerine göre yenilenmesi: İskenderun millet parkı örneği" *Kent Akademisi* 2022; 15(1), 1-18.
- [64] İskenderun görseli, Google Earth, Erişim Tarihi: 29 Eylül 2022.
- [65] TÜRKLİM. "Türkiye Liman İşletmecileri Derneği" İstanbul. <http://www.turklim.org/cevre-dostu-yesil-liman-sertifikalarisahiplerini-buldu/>. Erişim Tarihi: 22.05.2022.
- [66] Limak 2021. "Sürdürülebilirlik raporu "Ankara. <https://www.limak.com.tr/files/limak-soylemden-eyleme-raporu-2015-2021.pdf>. Erişim Tarihi: 03.04.2022.
- [67] İskenderun limanı görseli, Google Earth, Erişim Tarihi: 30 Ocak 2022.
- [68] HÇŞİM. "Hatay İli 2019 Yılı Çevre Durum Raporu, Hatay Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü" Hatay. [https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/hatay\\_2019\\_-cdr-20201110085053.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/hatay_2019_-cdr-20201110085053.pdf). Erişim Tarihi 2020.
- [69] Hatsu. "Hatay Büyük Şehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü" Hatay. [https://www.hatsu.gov.tr/index.php?sayfa=atik\\_su\\_tesisleri](https://www.hatsu.gov.tr/index.php?sayfa=atik_su_tesisleri). Erişim Tarihi 18 Mayıs 2022.
- [70] İskenderun Kaymakamlığı. "İskenderun millet parkı ve sahili, İskenderun kaymakamlığı resmi internet sitesi" <http://iskenderun.gov.tr/iskenderun-millet-parki-sahili>, Erişim Tarihi: 01.02.2022.



## Barajların deşarj yapılarındaki akış karakteristikleri ve enerji kırıcı yapıların etkinliğinin sayısal analizi

### *Numerical analysis of the efficiency of flow characteristics in the discharge and energy dissipators structures of dams*

Selman OĞRAŞ<sup>1,\*</sup>, Fevzi ÖNEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü [ugras\\_selman@hotmail.com](mailto:ugras_selman@hotmail.com) ORCID: 0000-0002-0347-3482,

<sup>2</sup>Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü [fonen@dicle.edu.tr](mailto:fonen@dicle.edu.tr) ORCID:0000-0002-2368-1035,

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*

Geliş 05 Ekim 2022  
Revizyon 26.Ekim 2022  
Kabul 10 Aralık 2022  
Online 31 Aralık 2022

*Anahtar Kelimeler:* Barajlar,  
Deşarj Yapıları, Enerji, Flow3D

#### ÖZ

Baraj mühendisliğinin araştırma konularından olan barajların deşarj yapılarının hidrolik karakteristikleri ve ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu dikkate alındığında etkin bir proje tasarımı için yapılacak fiziksel modelleme, prototip deneyler ve sayısal modelleme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Deşarj yapılarının performansını değerlendirmek için kullanılan fiziksel model yöntemi geçmişte ve günümüzde başarılı olmasına rağmen HAD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) yönteminin de fiziksel modellemeye göre çeşitli avantajlar sunduğu bilindiğinden günümüzde yapılacak hidrolik alanındaki mühendislik tasarımları artık deneysel çalışmalar ile birlikte HAD yazılımının kullanılmasını gerektirmektedir. Bu tür programların birçok hidrolik yapıların projelendirilmesinde kullanılması, planlanmada daha az hata oluşmasını, daha kısa zamanda ve daha ekonomik olarak yapılmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada fiziksel model çalışmalarıyla belirlenen İlisu Barajı dolusavak yapısındaki hidrolik karakteristikler ve enerji kırıcı yapıların etkinliği Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın sayısal modellemesinde özellikle açık kanal akımı, sediment taşınımı, oyulma gibi problemlerin çözümünde başarılı bir yazılım olan Flow3D kullanılmış olup sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü, basınç değerleri ve hız profilleri, 1/100 ve 1/30 model ölçekleriyle yapılan fiziksel model deney ölçümleriyle karşılaştırılarak ilgili sayısal analiz yönteminin performansı değerlendirilmiştir.

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received 5 October 2022  
Received in revised form 26 October 2022  
Accepted 10 December 2022  
Available online 31 December 2022

*Keywords:* Dams, dissipation structures, energy, Flow3D

*Doi:* 10.24012/dumf.1184570

\* Sorumlu Yazar

#### ABSTRACT

Physical modeling, prototype experiments and numerical modeling results should be evaluated together for effective design, considering the hydraulic properties of the discharge structures of dams, which are research subjects of dam engineering, and the safe and economical distribution of the resulting energy. Although the physical model method used to evaluate the performance of discharge structures has been successful in the past and today, it is known that the CFD method offers various advantages over physical modeling. Engineering designs in the field of hydraulics to be made today require the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) software together with experimental studies. Because the use of such programs in the design of many hydraulic structures will ensure that there are fewer mistakes in planning, and that it will be done in a shorter time and more economically. In this study, the hydraulic characteristics in the discharge structures determined by the physical model studies and the efficiency of the energy dissipating structures were numerically investigated by the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. In the numerical modeling of the study, Flow3D, a successful software, was used to solve problems such as open channel flow, sediment transport, and scour, and the water surface pressure values and velocity profiles obtained from numerical calculations were compared. In this comparison, the performance of the numerical analysis method was evaluated by using the physical model test measurements made with the 1/100 and 1/30 scale models.

## 1. Giriş

Su, hayatın sırlarının en önemlisidir. Tarihteki ilk medeniyetlerin yerleşim bölgeleri hep su kaynaklarının yakınında olmuştur. Bilim tarihinde bilgi bakımından toplulukların dayanışmasına ilk misallerin yine su ile ilgili olduğu dikkate alındığında, ilgili bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak medeniyetlerin geliştiği söylenebilir. Özellikle modern çağımızda insanın çevre ile olan karşılıklı etkileşiminin çok yönlü olarak artması sonucunda su talebi de orantılı olarak gittikçe artmıştır. Artan talebin karşılanması için kurak zamanlarda kullanılmak üzere sulak zamanların akarsu, nehir, ırmak, çay veya dere sularının bent, sedde, bağlama ve barajlar vasıtasıyla yolunun kesilerek biriktirilmesiyle ihtiyaç olunan talep karşılanmaya çalışılmıştır. Bu yapılar günümüzde bile sadece içme suyu amacıyla değil, aynı zamanda tarım, ulaşım, endüstri, korunma, barınma elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. İhtiyaçlar dikkate alındığında neredeyse tümünü karşılayabilecek biriktirme yapıları olarak barajlar ön plana çıkmaktadır [1]. Bu yapılar sınıflandırılırken çeşitli kriterler dikkate alınmaktadır;

\*Büyükliklerine göre; büyük baraj ve küçük baraj,

\*Yüksekliklerine göre sınıflandırma; baraj yüksekliği 100 m'den fazla ise yüksek baraj, 50 ile 100 m arasında orta yükseklikte baraj, 50 m'den az ise alçak baraj,

\*Yapılış amaçlarına göre sınıflandırma; Sulama barajı ve taşkın koruma barajı,

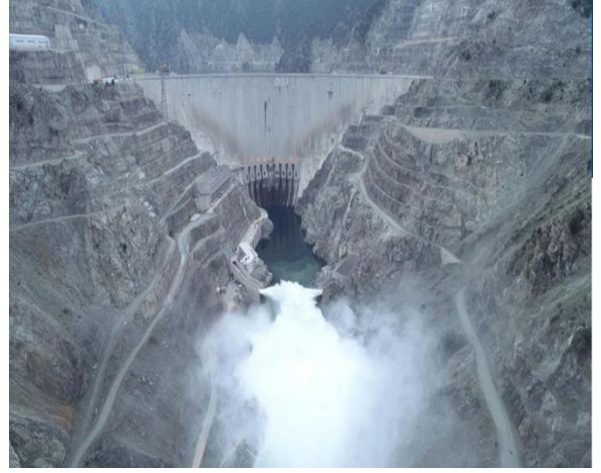
\*Fonksiyonlarına göre sınıflandırma; biriktirme barajı, taşkın geciktirme barajı, kabartma barajı,

\*Gövdenin statik projelendirmesine göre sınıflandırma; Ağırlık barajı, Kemer baraj (Şekil 1), Kemer ağırlık baraj, Payandalı baraj, Dolgu baraj, Ön germeli baraj,

\*Hidrolik özelliğe göre sınıflandırma; Üzerinden su akan ve akmayan baraj,

\*Gövde malzemesine göre sınıflandırma; Kargir, Beton, Dolgu baraj, Ahşap baraj, Çelik baraj, Lastik baraj olmak üzere çeşitli sınıflandırmaya tabi tutulmuştur [2].

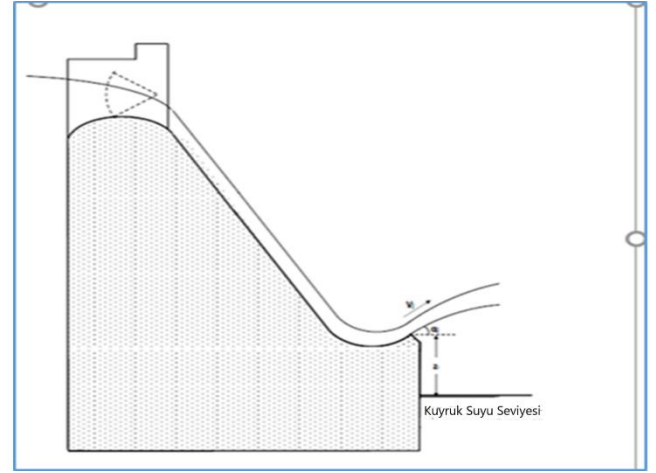
Baraj yapılarının taşkın sırasındaki güvenliğini sağlamak amacıyla deşarj yapıları olarak dolusavaklar inşa edilmektedir. Bu yapılar, barajı taşmaya karşı korumak için akışı kontrol ederek fazla suyu rezervuardan kuyruk suyuna aktarır. Amerika Birleşik Devletleri İçişleri Bürosu Islah Departmanı'nın (United States Bureau of Reclamation, USBR) tanımına göre, rezervuar alanında tutulamayan fazla suyu (sel suyu) serbest bırakmak için, ayrıca derivasyon barajlarındaki taşkın sularını derivasyon sistemine baypas etmesi için inşa edilmektedir[3].



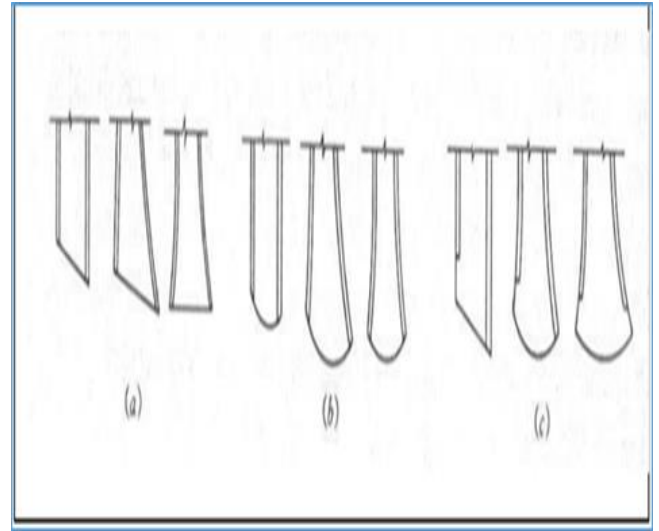
Şekil 1. Beton Dolgulu Kemer Baraj (Deriner Barajı)

Söz konusu deşarj yapıları birkaç farklı türde inşa edilebilmektedir. Başlıca; Basamaklı, Labirent, Sifon, Yanal, Şaft, Serbest Taşmalı, Tünel, Şut Kanallı ve Ogee dolusavaklardır [4]. Dolusavakların boyutları gelişen dünya nüfusu ile birlikte doğan enerji ihtiyacını karşılamak için son 30 yılda oldukça artış gösterdiğinden ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu baraj mühendisliğinin zor olan konuları arasında bulunmaktadır[5]. Bu tür yapıların tasarım ve inşaat ihtiyaçlarını karşılamak için hidrolik araştırmalar önem kazanmıştır. Bu çalışmalar ihtiyaçlar doğrultusunda belirlendiğinden ihtiyaçlar arttıkça proje karakteristikleri de buna göre değişim göstermiş, ayrıca teknoloji de bu doğrultuda gelişmiştir. Şimdiye kadar büyük taşkın debileri için gerçekleştirilen prototip deneyler sonucunda yeni tip enerji kırıcılar kullanılmak suretiyle birçok büyük proje tasarlanmıştır. Bununla birlikte taşkın deşarjı ve enerji kırınımı için tercih edilen yöntemler çeşitlidir. USBR tarafından uzun yıllar yapılan çalışmalar sonucunda tasarlanan ve tip 1, 2, 3, 4 şeklinde sınıflandırılan ve dolusavakların alt kısmında inşa edilen hidrolik sıçramalı bu yapılar, dolusavak yapısının ucunda yuvarlak eşik (roller bucket) (Şekil 2) tasarlanarak kavisli kısımda meydana gelen hidrolik sıçrama ile enerji kırınımı gerçekleştirilebileceği gibi, yine dolusavak yapısının sonunda inşa edilen sıçratma eşiği (ski jump) yardımıyla akımın havalandırılarak yapıdan uzak bir noktaya fırlatılması ve hava direnci etkisiyle jetin enerjisinin dağılması sağlanabilmektedir. Sıçratma eşikleri, serbest jet fırlatmalı enerji kırıcı (ski-jump bucket), ve çevirmeli sıçratma eşikli enerji kırıcı (flip bucket) olarak sınıflandırılır [6]. Serbest fırlatma yapısının ana amacı, ana barajda oyulma açısından sıkıntı oluşturmayacak şekilde akıntı yönünde mümkün olduğunca büyük bir mesafede jet çarpmasını sağlamak iken çevirmeli sıçratma eşiginde, enerji dağılımı genellikle dalma havuzu (plunge pool) ve hava sürüklenmesi ile oluşturulmaktadır [7]. Steiner ve ark. [8] gibi birçok araştırmacı çevirmeli sıçratma eşiğini

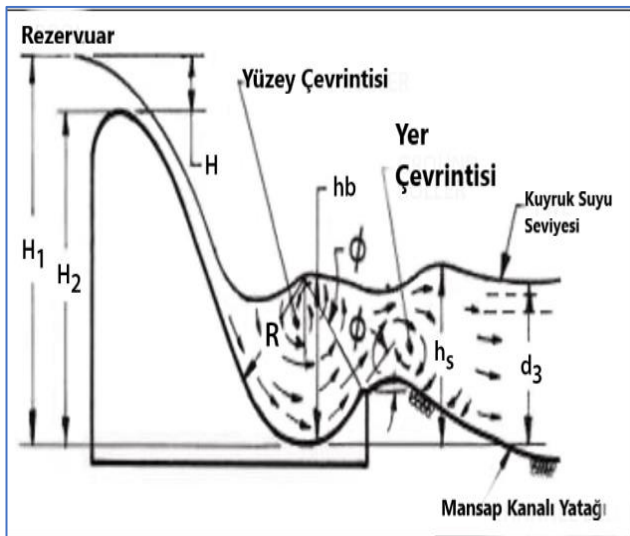
(flip bucket), fırlatmalı eşik (ski jump) (Şekil 3) yapısı ile aynı kategoriye koymaktadır. Sıçratma eşiklerinin halihazırda, çok çeşitli sapma açıları, fırlatma açıları, göreceli eğrilik yarıçaplı, dişli yapı elemanları gibi özel elemanlar içeren çeşitli geometrilere sahip (Şekil 4-5) binlerce tasarımı aktif olarak çalışmakta, ancak bunlar için sınırlı standart ve sadece birkaç tasarım yönergesi mevcuttur [9]. Serbest Jet yörüngeleri de yine tercih edilebilen enerji kırıcı yöntemlerden biridir. Baraj kretinin üstünden deşarj olan serbest akış, aşağıya doğru hava direncine ve hava sürüklenmesine maruz kalır. Hava sürüklenmesi nedeniyle su jetinin kuyruk suyuna dalmadan önce önemli miktarda enerjisi sönümlenir. Nehir yatağına dalma ile birlikte daha fazla enerji kaybı elde edilir. Serbest jet akışı kemer barajlarda kret üstünde, ayrıca dip savakların çıkışlarında oluşmaktadır. Bu yapılar dizayn edilirken baraj tipi, barajla bağlantılı yapıların yerleşimi, ilgili yapılardaki hidrolik durum, çevre, jeoloji, giriş ve çıkış debi miktarları, baraj yüksekliği, ekonomik değerlendirme gibi faktörler göz önüne alınmaktadır. Bunların dışında büyük barajlar için sıçratma eşikleriyle birlikte kombine olarak inşa edilen jet etkileşimli havuzlar, dalma havuzları (plunge pool), taban kaplamalı düşü havuz (stilling basin) gibi yöntemler yerel durumlar da göz önüne alınarak kullanılmaktadır. Enerji kırıcı yapı türlerinden bir diğeri de iç enerji kırıcı yapılar olan tünellerde inşa edilen yapılardır. Alandaki topografik ve jeolojik şartlar uygun ise hem projenin daha düzenli olması hem de maliyetin azalması için derivasyon tünellerinin içinde örneğin orifis kapaklar, yüzük şeklindeki engeller (tumbling) tasarlanmak suretiyle büyük miktarda enerji kırılımı gerçekleştirilebilir. Tabii olarak bu yöntemdeki en büyük sıkıntı kavitasyon, sediment ve dolayısıyla erozyon hususudur. Çözümü ise gerekli basıncı ayarlamak, orifis plakalarda gerekli optimizasyonu yapmak, anti erozyon malzeme kullanmaktır [5].



Şekil 3. Fırlatmalı Sıçratma Eşiği (Ski Jump)



Şekil 4. Flip bucket türleri a. eğimli, b. dil şeklinde, c. eğimli (kısa yan duvarlar dahil)



Şekil 2. Yuvarlak Sıçratma Eşiği (Roller Bucket)



Şekil 5. Dişli Sıçratma Eşiği (Slotted Bucket)

Söz konusu deşarj yapılarında ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu dikkate alındığında etkin bir proje tasarımı için yapılacak fiziksel modelleme, prototip deneyleri ve sayısal modelleme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Nitekim bu doğrultuda çok sayıda çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır.

Chanel ve Doering [10], daha önce fiziksel model çalışmaları yapılmış olan 3 farklı hidroelektrik santralin dolusavaklarının farklı su yükü ve dolusavak yüksekliklerini göz önüne alarak,  $P/Hd$  ( $P$ :dolusavak yüksekliği,  $Hd$ :dolusavak tasarım su yüksekliği) oranının değişimini bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi olan Flow3D ile sayısal analizini yapmışlardır.

Ho ve ark. [11], Avustralya genelinde çeşitli dolusavak uygulamalarını modellemek için Flow3D programını kullanarak elde ettikleri sonuçlara göre tasarım seviyelerine eşit ve üzerindeki su yükseklikleri için debi miktarının genellikle fiziksel model verilerinden %5 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca sayısal modellerin fiziksel model debi deşarjlarını %3 oranında fazla tahmin ettiğine dair genel bir sonuca ulaşmışlardır.

Gessler [12], yaptığı çalışmada su yüzeyi profillerinin fiziksel model karşılaştırmalarına göre HAD'ın deşarjları %3'e kadar eksik tahmin ettiğini belirtmiştir. Ayrıca %5'lik farkların elde edildiği analizlerinde oluşan jet profillerinde de gayet iyi sonuçlar alındığını belirtmiştir.

Savage ve Johnson [13], Flow3D programını kullanarak standart ogee dolusavakların simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları fiziksel model, USBR ve USACE(United States Army Corps of Engineers) verileriyle karşılaştırdıklarında Flow3D'nin  $0,7*Hd$  den büyük su yükseklikleri için debi değerlerinin fiziksel model sonuçlarına göre biraz fazla tahmin ettiğini, USACE ve USBR standartlarının ise fiziksel model debi deşarjlarını sırasıyla yaklaşık %1.5 ve %5 oranında düşük tahmin ettiğini tespit etmişlerdir.

Dursun ve Öztürk [14], Özellikle son otuz yıldır gelişen baraj inşa tekniklerinin (silindire sıkıştırılmış beton baraj metodu gibi), basamaklı dolusavakların popülaritesini artırdığını, bu tip dolusavaklarda klasik dolusavaklara göre %70-80 oranlarında daha fazla enerji sönmülmesinin mümkün olduğunu, kendilerinin de farklı boşaltım kanalı taban eğimleri için enerji sönmülme oranlarını sayısal yöntemle belirleyerek benzer konuda daha önce fiziksel modelleri yapılan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmasını amaçlamışlardır.

Baba Ali ve ark. [15], Nazloo Barajı'nın dolusavak tasarımında inşa edilen enerji kırıcı havuzun etkinliğini

fiziksel ve sayısal olarak modelleme yoluna gitmişlerdir. USBR Tip- II enerji kırıcı havuzun yan duvarlarında  $5^{\circ}/7,5^{\circ}/10^{\circ}$  ve  $12,5^{\circ}$  açılarla havuzun mansabına doğru daraltmak suretiyle oluşacak hidrolik sıçramanın da katkısıyla meydana gelen enerji sönmülmesi oranını farklı debiler için araştırmışlardır. Flow3D programı ile analizi yapılan modelde türbülans modeli olarak RNG (Renormalize Grup Denklemleri)  $k-\epsilon$  ve Standart  $k-\epsilon$  modellerini ayrı ayrı çalışmışlardır.

Valero ve Rafael [16], dolusavak üzerindeki serbest akışı, Flow3D programı yardımıyla hava sürüklenme (airentriment) ve sürüklenme akışı (drift flux) modellerini kullanarak elde ettikleri hava konsantrasyon katsayısını, daha önceki prototip çalışmalarından elde edilen sonuçlarla kıyaslamışlardır.

Usta [17], Laleli barajı dolusavak fiziksel model sonuçlarını sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmıştır. Flow3D programının kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG model tercih edilmiştir. 1/25 ölçekli olarak yapılan fiziksel model, aynı zamanda 1/1 olarak da çözümlenmiş olup ölçek etkisi de tespit edilmiş, ayrıca fiziksel modelde ortaya çıkan kaviteasyon hususu için de sürüklenme (air entrainment) modeli çalıştırılmıştır.

Daneshfaraz ve ark. [18], USBR standartlarına sahip ogee dolusavağında ve hemen mansabında meydana gelen enerji kırıcının etkinliğini farklı varyantlar için araştırmışlardır. Çalışmalarında hem fiziksel hem de sayısal model ele alınarak sonuçların karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Flow3D programının kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG türbülans modeli seçilmiş ve analiz için beş farklı hücre boyutu kullanılmıştır. Varyant olarak; Ogee profilinin üstünde blokların eklenmesi şeklinde, ayrıca dolusavak ucunda  $32^{\circ}$  ve  $52^{\circ}$ 'lik sıçratma eşiği kullanılarak oluşan jet uzunluğu ve enerji kırılımı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Zhenwei ve ark. [19], laboratuvarında tasarladıkları dolusavağın hidrolik karakteristiklerinin tespiti için deney yapmışlardır. Ayrıca aynı yapının sayısal analizi için de Fluent yazılımını kullanarak elde ettikleri sonuçları kıyaslamışlardır.

Khani ve ark. [20], dolusavak eşik mansabındaki sıçratma eşiği (flip bucket) üzerinde oluşan basınç ve hız dağılımı gibi hidrolik karakteristikleri belirlemişlerdir. Bunun için S. Eklund (2017)'in çalışmasındaki teorik ve deneysel yöntemler sonucu ortaya çıkan basınç diyagramını dikkate alarak aynı grafiğe yapılacak sayısal analiz sonuçlarını ekleyerek ilgili teorik ve deneysel değerlere nümerik sonuçları da eklemek istemişlerdir.

Yavuz [21], yaptıkları fiziksel model deneylerinde elde ettikleri jet mesafesi ile Kawakami (1973)'nin ve

Khatsuria (2005)'nin ampirik denklemlerinde elde edilen jet mesafesi ve ayrıca sayısal simülasyon sonucu edinilen jet mesafesinin kıyaslanarak oluşan debi-enerji sönümlenme yüksekliği denklemini elde etmiştir.

Aydın ve ark. [22], çalışmalarında boşaltım kanallarındaki enerji kırıcı yapıların etkinliğini sayısal olarak incelemişlerdir. Peterka (1984)'nin deneysel çalışmalarından uyarlanan model, klasik şüt kanalı ve bu kanal üzerine yerleştirilen enerji kırıcı bloklardan oluşmaktadır. Flow3D'nin kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG modeli, sınır koşulları olarak giriş hızı ve çıkış koşulu da serbest çıkış tercih edilmiştir.

Bu çalışmada da HAD yazılımı Flow3D kullanılarak Iısu barajı dolusavağı için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini Renormalize Grup Denklemleri (RNG) türbülans kapama modeli ile analizler gerçekleştirilmiştir. Flow 3D kullanılarak 1/100,1/30 ve 1/1 (prototip) ölçeklerinde çeşitli akış senaryoları simüle edilerek elde edilen sonuçlar, DSİ TAKK laboratuvarında 1/100 ve 1/30 ölçeklerinde inşa edilen Iısu Baraj dolusavağının fiziksel model testlerinden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve böylece HAD yönteminin etkinliği ortaya konulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

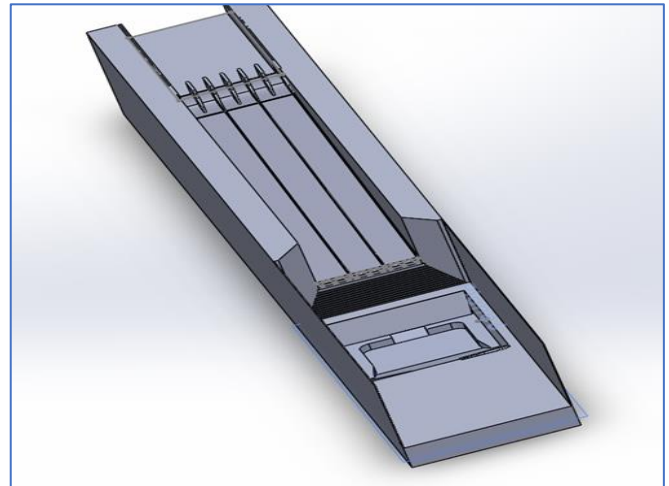
### 2.1 Çalışma Alanı

Iısu barajı, Türkiye'nin güney doğusunda Dicle Nehri üzerinde yer almaktadır. Bu baraj, Önyüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu barajlar içerisinde gövde uzunluğu ve yüzey alanı bakımından dünyada en büyük, gövde dolgu hacmi bakımından Atatürk Barajından sonra Türkiye'nin 2. büyük, Kurulu güç bakımından Atatürk, Karakaya ve Keban Barajlarından sonra 4. büyük, Dicle Nehri üzerinde yapılmış ve yapılacak olan en büyük Baraj ve HES'tir. Tamamlandığında, sadece elektrik enerjisi üretiminden ekonomiye yılda 412 Milyon \$ fayda sağlaması planlanmaktadır. Uygulanarak yapımı tamamlanan barajın toplam dolusavak genişliği 124 m olup altı adet radyal kapak ile kontrol edilmektedir. Dolusavak boşaltım kanalının eğimi 1/8,25 'tir. Iısu barajı dolusavağı dişli çevirmeli tip sıçratma eşiği (slotted bucket) ve dalma havuzu ile sona ermektedir. Dolusavak tepesi ile çevirmeli sıçratma eşiği mansap ucu arasındaki kot farkı 70 m (510-440)'dir.

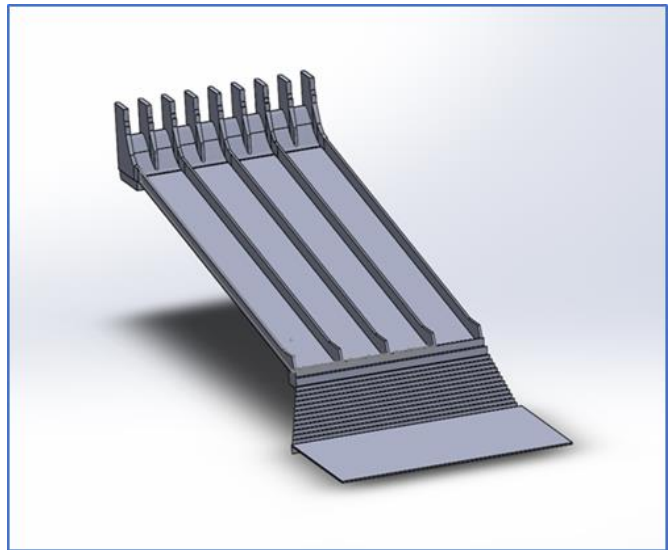
Iısu Barajı dolusavağı 2010 yılı revize uygulama projeleri MMF (muhtemel maksimum feyezana) taşkın debisine göre boyutlandırılmış olup 6 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; Eşik Yapısı - Şüt Kanalı - Sıçratma Eşiği – Apron - Enerji Kırıcı Havuz - Boşaltım kanalıdır (Şekil 6). Söz konusu barajın dolusavağı 6 adet radyal kapak tarafından kontrol edilmektedir. Barajın kapak sayısı fiziksel modelde 8 adet 16x16 m'dir (Şekil 7). DSİ Barajlar Hidroelektrik Santralleri

Daire Başkanlığı tarafından hazırlanan Revize Dolusavak Hidrolik Raporunda ise 6 adet 15x16 m olarak değiştirilmiştir. 2010 yılı revize dolusavak hidrolik raporuna göre baraj yerinin en büyük taşkın piki 20357 m<sup>3</sup>/s dir. Dolusavak kapasitesinin tayini için MMF kullanılarak taşkın ötelemesi yapılmış ve bu öteleme esnasında suyun rezervuarda ne kadar yükseldiği tespit edilerek hava payı bulunmuştur. Maksimum kapak açıklığında dolusavak 14799 m<sup>3</sup>/s debi atabilmektedir. Dolusavağın bu debiyi attığı andaki rezervuar su seviyesi ise 527.86 m'dir [23].

Iısu Barajı dolusavağı 1982 yılı fiziksel model raporuna göre tasarlanan yapıda ise enerji kırıcı havuz bulunmamaktadır. 1980 yılında tasarlanan projede 8 adet radyal kapak mevcut iken maksimum taşkın debisi ise 17988 m<sup>3</sup>/s olarak ölçülmüştür. Dolusavağın bu debiyi attığı andaki rezervuar su seviyesi ise 527.05 m'dir. İlgili modelde ihtiyaç olunan enerji sönümlenmesini temin için sıçratma eşiği 3 farklı şekilde tasarlanmış elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 6. Iısu Barajı 2010 Yılı Dolusavak 3D Yapısı



Şekil 7. Iısu Barajı 1982 Yılı Dolusavak 3D Yapısı

### 2.1.1 Ilısu Barajı Dolusavak Enerji Kırıcı Yapıların Tasarımı

Ilısu Barajı ve HES Projesinde dolusavak yapısında meydana gelen enerjinin sönmülmesi için ilk olarak şut kanalının sonunda çevirmeli sıçratma eşiği (flip bucket) tasarlanmıştır. Daha sonra proje firmasının tavsiye ettiği dişli sıçratma eşiği Varyant-I modele uygulanmıştır. Bu tasarımda eşikteki diş üst genişliği 12 m, dişin yan şev açısı 1/2.15 olarak alınmıştır. Ayrıca dişler arası yarıkların yatay ile yaptıkları açı olan Beta sıçratma açısı 3.55° olarak seçilmiştir. Dişli sıçratma eşiği (slotted bucket) Varyant-I için yapılan modelleme sonuçları dikkate alındığında; dişin üst genişliğinin eşik yapısına nazaran büyük olduğu ve buna karşın yarık genişliklerinin napın havalanması için yeterli olmadığı görüldüğünden bu durumu düzeltmek için yapılan çalışmalar sonunda dişli sıçratma eşiği Varyant-II alternatif olarak tasarlanmış ve elde edilen sonuçlara göre de en uygun varyant olarak belirlenmiştir. Bu eşikte diş üst genişliği 10.97 m, diş yan şevleri ½, dişler arası mesafe 1.46 m ve ayırma duvarına bitişik şevler Varyant-I'de olduğu gibi 1/1 yapılmıştır. Beta sıçratma açısı 2.78° olarak seçilmiştir [24].

### 2.2 Metod

Flow3D, önerilen dolusavak tasarımlarının hidrolik performansını doğrulamak ve baraj güvenlik gereksinimlerini karşılama hususları için yaygın olarak kullanılmaktadır [25]. Bu çalışma kapsamında Ilısu baraj dolusavağının 1/100, 1/30 ve 1/1 ölçekli sayısal model simülasyonları tamamlanmıştır. Hidrolik parametreler simülasyonlardan elde edilmiş ve sonuçları deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Birkaç farklı senaryo uygulanarak en optimum ve doğru çözümler bulunmaya çalışılmıştır.

#### 2.2.1 Uygun Hesap Ağı

Uygun hesap ağının tespiti için eldeki laboratuvar ölçümleri en önemli verilerdir. 1982 yılı modelinin sayısal analiz sonuçları ile fiziksel model sonuçları kıyaslanarak uygun hesap ağına ulaşılmıştır. Bunun için öncelikle kaba bir hesap ağıyla çözümler yapılmıştır. Daha sonra hesap hücreleri küçültülerek alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların hesap hücrelerinin boyutlarına bağlı olmaktan çıktığı ve çözüm süresi olarak da en optimum sonucu veren hesap ağı(mesh) tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunlara ek olarak model içindeki "Favorized" seçeneği kullanılarak katı geometri, her bir hesap ağı için kontrol edilmiştir. Sayısal analizlerde ağ tasarımı yapılırken modelin büyük olması durumunda tek bloklu tasarım hücre sayısının çok fazla olmasına neden olmaktadır. Buna karşın simülasyon çözünürlüğünü yalnızca

ilgilenilen alanda artırmak ve ilgilenilmeyen bölgeleri hariç tutmak adına çoklu ağ bloğu yöntemi kullanmak etkili çözümlerdir. Flow3D, modelin tümünde kullanılan ağ bloğu türünü "Non-Conforming Mesh" şeklinde adlandırırken özel olarak ilgilenilen kısım için ise "Conformed Mesh" olarak adlandırmaktadır. Söz konusu ağ tiplerinin özellikleri de dikkate alınarak modelimizin tamamında geçerli olan non-conformed blok'a ek olarak enerji kırıcı yapının memba ve mansabını da kapsayacak şekilde ikinci bir ağ bloku (conform to blocked volume) tanımlanmıştır. "Conform to blocked volume" olarak tanımlanan bu blok sayesinde özellikle geometrinin değiştiği boşaltım kanalı sonunda (slotted bucket) enerji kırıcı yapının daha net algılanması beklenmiştir. Fiziksel model ve sayısal model sonuçlarının birbirlerine olan yakınsama oranları ve uygun ağ elde edilebileceği hususu da göz önüne alınarak elde edilen debi ve jet profillerinin yanı sıra ağ boyutlarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde (Şekil 8) görüleceği üzere ogee üzerinde performans kriteri olarak 5 adet farklı ağ boyutu için 9 farklı noktada hesaplanan su yüzü profillerinin OKH (Ortalama Karesel Hata) ve OMGH (Ortalama Mutlak Göreceli Yüzde Hata) değerleri verilmiştir. Şekilde küçülen hücre boyutlarına bağlı olarak hata oranı T5 testi hariç gittikçe azalmış, buna paralel hücre sayısı ve çözüm süresi de oldukça uzamıştır. İlgili sonuçlara göre zaman/kaynak gözetilerek ve ayrıca oluşan jet profillerinin durumu da göz önüne alınarak T3 testi uygun ağ ölçüleri olarak seçilmiştir (Şekil 9).

#### 2.2.2 Sınır Koşulları

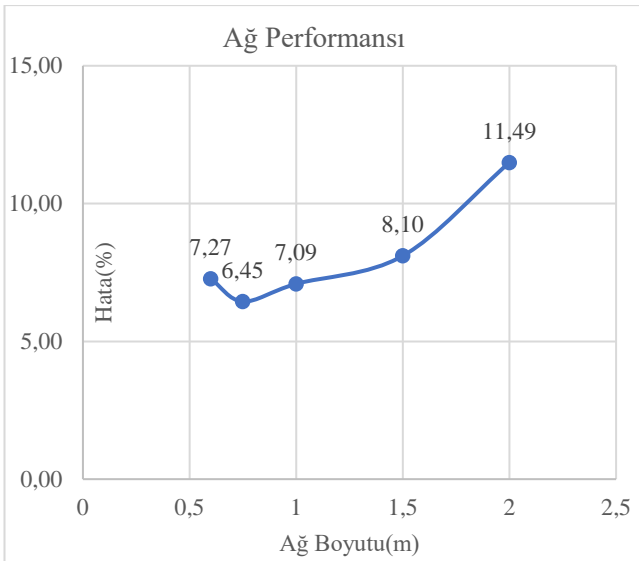
Sınır koşulları olarak, maksimum hesap yüküne denk gelen 527,05 m rezervuar seviyesi giriş koşulu seçilmiştir (Xmin). Bu sınır koşulunda rezervuar bulunduğu dolaylı sonsuz rezervuar varsayımı dikkate alınmış ve başlangıç olarak sıfır hız ve sıfır hidrostatik basınç, yani "stagnation pressure" söz konusudur. Çıkış koşulu ise santral tam kapasite çalışırken oluşacak kuyruk suyu kotu olan 422 m'dir (Xmax). Çözüm bölgesinin üst sınırında ise sınır şartı olarak yine basınç koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşulu, yerçekiminden dolayı herhangi bir etkisi olmadığı için serbest yüzeyde atmosfer basıncının da etkisiyle enerji kırıcı bölgesinde suyun serbest hareket etmesi sağlanmıştır (Zmax). Serbest yüzey, akışkan hacmi (Volume Of Fluid, VOF) yaklaşımı ile belirlendiğinden su-hava arakesitinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit atmosfer basıncı etkili olmaktadır. Katı sınır yüzeylerinde kaymama (no-slip) sınır koşulu uygulanmıştır (Ymax, Ymin, Zmin). Dolayısıyla simetri koşulu uygulanmak suretiyle cidar



yüzeylerinde yatay ve düşey doğrultudaki hız bileşenleri sıfır olmaktadır. Ayrıca yaptığımız çalışmada tüm simülasyonlar için renormalizasyon grubu RNG k -  $\epsilon$  türbülans modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Flow3D kullanıcı kılavuzundaki RNG türbülans modelinin yazılımda mevcut olan en doğru ve sağlam model olduğu ve yapılan literatür çalışmalarında ilgili modelin daha etkin ve gerçeğe yakın sonuçlar vermesinden dolayı kullanılmıştır.

Test No	Hücre Boyutu (non-conformmed mesh)	Hücre Boyutu (Conformmed to block volume mesh)	Toplam Hücre Sayısı	OKH	OMGH
T1	2	1	2000000	0,79	11,49
T2	1,5	0,75	5000000	0,54	8,10
T3	1	0,5	18000000	0,52	7,09
T4	0,75	0,375	38000000	0,48	6,45
T5	0,6	-	48000000	0,47	7,27

Şekil 8. Farklı Ağ Boyutlarının Performans Analizi



Şekil 9. Uygun Hesap Ağı Performansı

### 3. Bulgular

Üç boyutlu simülasyonlar zamana bağlı çözülerek tamamlanmıştır. Öncelikle uygun hesap ağı seçimi yapılarak çözüm için en optimum hesap hücre boyutu ve konfigürasyonu belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen hesap ağı kullanılarak model üzerinde detaylı incelemeler yapılmıştır. Ilisu Barajı dolusavağının yarısı hesap ağına dahil edilmiştir. Y eksenini simetri alındığından yapının tamamı analize dahil olmuştur. Debi sonuçları yapının tamamına göre verilmiş olup sayısal model sonuçlarına göre taşkın deşarj debisi fiziksel modelden %3.2 daha fazla çıkmıştır.

### 3.1 Dolusavak Ogee Eşik Yapısı ve Boşaltım Kanalının İncelenmesi

#### 3.1.1 Basınç, Su Yüzü ve Hız Değerleri

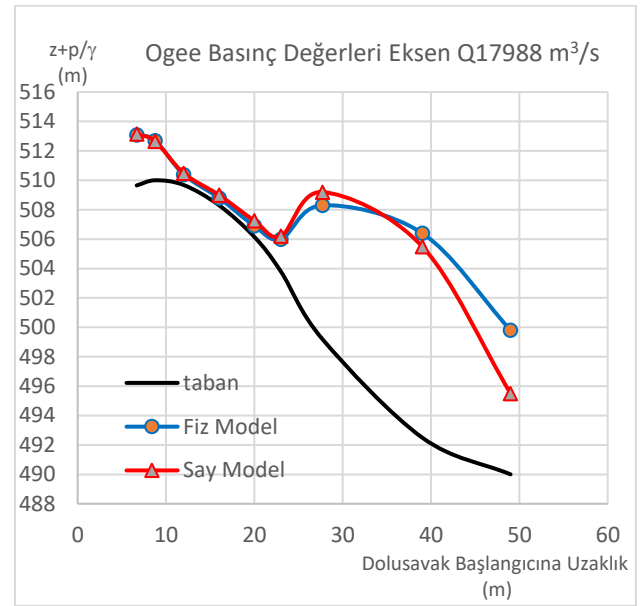
Yapılan analiz sonuçlarına göre eşik yapısındaki basınç değerleri ile ilgili olarak, fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verileri eşik yapısı için kıyaslandığında; Yapının eğimli-kavisli kısmında az da olsa farklı sonuçlar elde edilmişse de genel itibarıyla sayısal analiz değerlerinin fiziksel model basınç değerleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 10-11). Yine fiziksel model çalışmalarında dolusavak şut(boşaltım) kanalında basınç değerleriyle ilgili olarak fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verileri kıyaslandığında, sonuçların özellikle kanalın başlangıç ve orta kısımlarında hemen hemen aynı olduğu, kanalın sonuna doğru fiziksel model sonuçlarıyla nizamî bir miktar farkın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 12).

Fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verilerinin su yüzü profilleri, ogee eşik yapısı üzerinde sağ ve sol olmak üzere her iki sahilde, boşaltım kanalında ise sahiller ve eksende belirlenmiştir. Buna göre yapılan değerlendirmelerde; 17988 m<sup>3</sup>/s debi için su yüzü profilleri ile ilgili olarak dolusavağın hemen başlangıcında (ogee) meydana gelen su yüzü profilleri incelendiğinde kavisin olduğu kısım dışında nizamî bir su yüzü profili elde edilmiştir (Şekil 13 a). Aynı durum boşaltım kanalı için de geçerlidir. Ancak boşaltım kanalı sonunda basınç değerlerinde olduğu gibi nizamî bir farklılık ortaya çıkmıştır. Basınç değerlerinin tersine fiziksel modeldeki su yüzü profilleri sayısal modelden daha fazla çıkması da beklenen bir durumdur. Kanalın sonunda ortaya çıkan farklılığa neden olarak, artan hızla beraber türbülans kinetik enerjisinin su içerisinden serbest yüzeye çıkmasıyla gerçek durumda yani model deneylerde oluşan hava sürüklenmesi hususudur. Akış içerisine sürüklenen hava girişi ile beraber su seviyesi yükselecektir. Ancak sayısal modelde air entrainment modeli çalıştırılmadığından bu durum tespit edilememiş su yüzü profilleri fiziksel model deneylerindeki değerlerin altında kalmıştır. Hava sürüklenmesi hususu ile ilgili olarak, bilindiği üzere ogee üzerinden dökülen akış, boşaltım kanalından geçerken viskoz ve türbülanslı süreçlerin akış üzerindeki etkisi genellikle çok azdır. Akış kanal sonuna doğru hareket ederken artan hızın da etkisiyle enerji dengesinde az da olsa değişimler başlayacaktır. Sıçratma eşliğini terk ettikten sonra ve özellikle de mansap kanalındaki kuyruk suyu veya dalma havuzu ile temas ettiğinde güçlü momentum değişimleri meydana gelecektir. Devamında mansap kanalına giren akış parçacıkları, önceki kısımlara

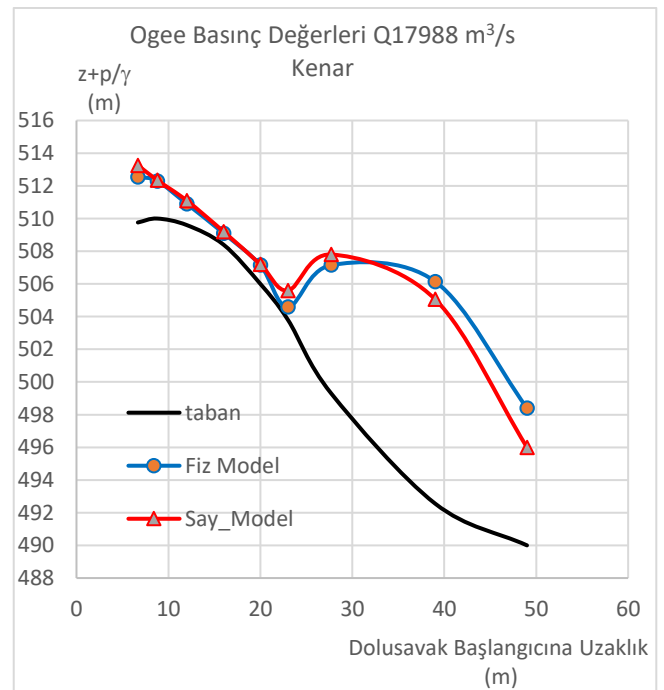
kıyasla daha düşük bir hidrolik enerjiyle yapıyı eder. Açıklanan hususun daha iyi anlaşılması adına Ilisu Barajı dolusavağının sayısal çözümlenmesi Q12500 m<sup>3</sup>/s için air entrainment modeli değişken yoğunluklu formülasyon(variable density flow) ile birlikte kullanılarak ve kullanılmaksızın yapılmış olup sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre; air entrainment modelinde ogee üzerinde hava sürüklenmesi tespit edilememiş ve su yüzü değerleri air entrainment modeli kullanılmadan yapılan analizlerle aynı çıkmıştır (Şekil 13 b). Boşaltım kanalında ise ogeeden hemen sonra kanal başlangıcında orta ayaklardan kaynaklı nispeten güçlü bir hava sürüklenmesi başlangıcı tespit edilmiş olup bu sürüklenme kanalın orta kısımlarında %7, sonlarına doğru ise %12 seviyelerinde olmuştur (Şekil 14). Sürüklenme sonucunda kanalın tümünde geçerli olacak şekilde su yüzü değerlerinde fiziksel model değerlerinden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Su yüzü değerlerindeki bu değişiklik basınç değerlerine yansımamış ve kanalın hemen her noktasında elde edilen basınç değerleri, ilgili model kullanılmadan oluşan çizgiyi takip etmiştir. Bu durum akışın hidrolik karakteristiklerine ters düşmektedir. Kanal sonuna doğru artan hava sürüklenmesi ile birlikte akışın basıncında azalma beklenmektedir. Ancak değişen akış koşullarının etkisi air entrainment modelinde görülmemiştir (Şekil 15 a, b). Nitekim bu durum önceki araştırmacıların dolusavak boşaltım kanallarındaki karakteristikler üzerinde sayısal analiz programlarının hava sürüklenmesi modelinin etkisini nicel olarak değil nitel olarak tespit ettiğini belirtmelerindeki sebep tam olarak bu şekilde ortaya çıkmaktadır. Sıçratma eşiği sonrasında oluşan jet profillerinde ve kuyruk suyu kanalında sürüklenme modelinin kullanılmasıyla jet profil mesafeleri ortalama %12 oranda kısalmış, kuyruk suyu kanalı tabanındaki basınçlarda da %60'a varan oranda düşüşler meydana gelmiştir. Oluşan bu vaziyet, ilgili air entrainment modelinin akış karakteristikleri üzerindeki etkisinin ortaya çıkması için sürüklenen hava hacim miktarının etkili olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Fiziksel Model çalışmalarında Q12500 m<sup>3</sup>/s debi için şut kanalının 0+81.5 / 0+256.5 / 0+456.5 / 0+496(eşik sonu) km'lerinde ölçülen hızlar ile sayısal analiz sonucu elde edilen hızlar ile ilgili olarak; boşaltım kanalının orta kısımlarına kadar hız değerlerinin uyumlu olduğu kanal sonuna doğru fiziksel modele kıyasla sayısal analiz modelinde hız değerlerinde daha fazla artış elde edildiği, air entrainment modeli kullanılmasıyla kanal sonundaki hız farkının azaldığı

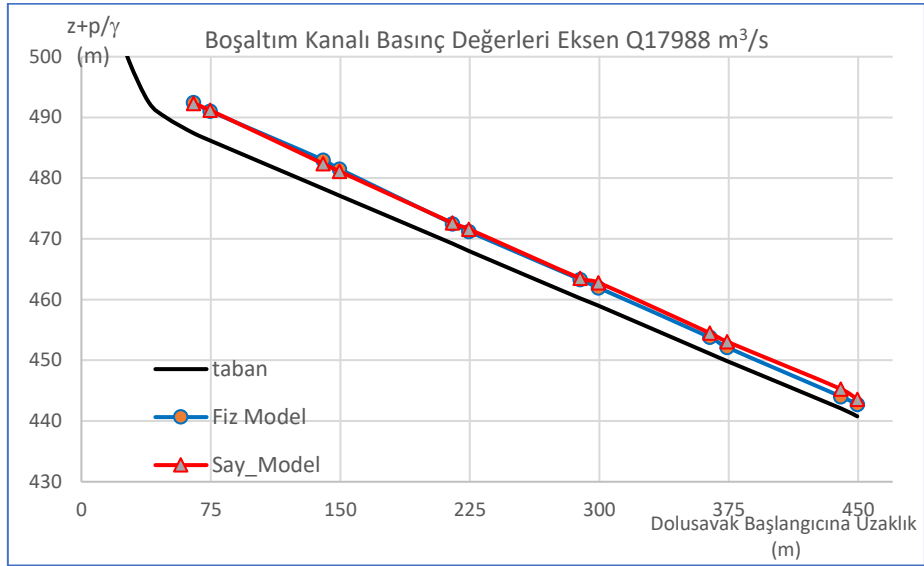
tespit edilmiştir. Oluşan bu durumun da hava sürüklenmesi etkisiyle kayma gerilmesinin azalması ve hızın artması teorisine zıt olduğu görülmüştür. Diğer hidrolik karakteristiklerinde olduğu gibi fiziksel modelin ölçekli olması hız değerleri profilini etkilemiştir. Sıçratma eşiği sonunda gerek flip bucket gerekse de varyantlarda eşik içerisindeki çevrinti etkisiyle hız değerlerinde düşüş görülmüş bu durum sayısal analiz sonuçları için de geçerli olmuştur. Varyantlarda dış üstündeki hız değerleri dış yarıklarındaki değerlere göre daha fazla düşüş göstermiştir (Tablo 1, Şekil 16 a, b).



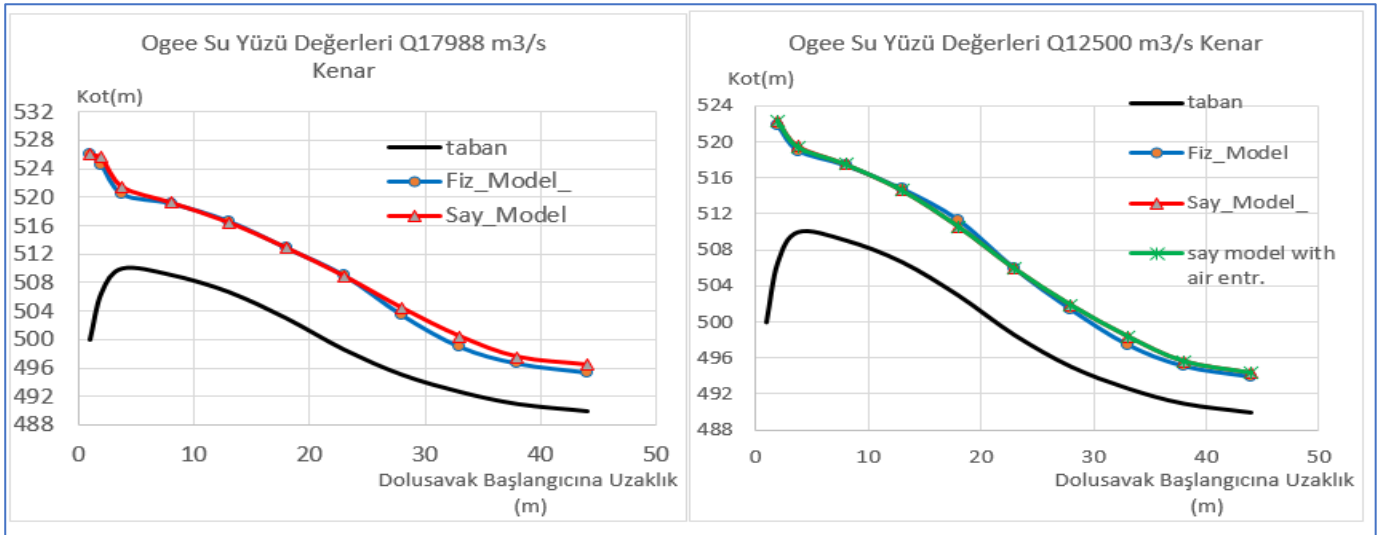
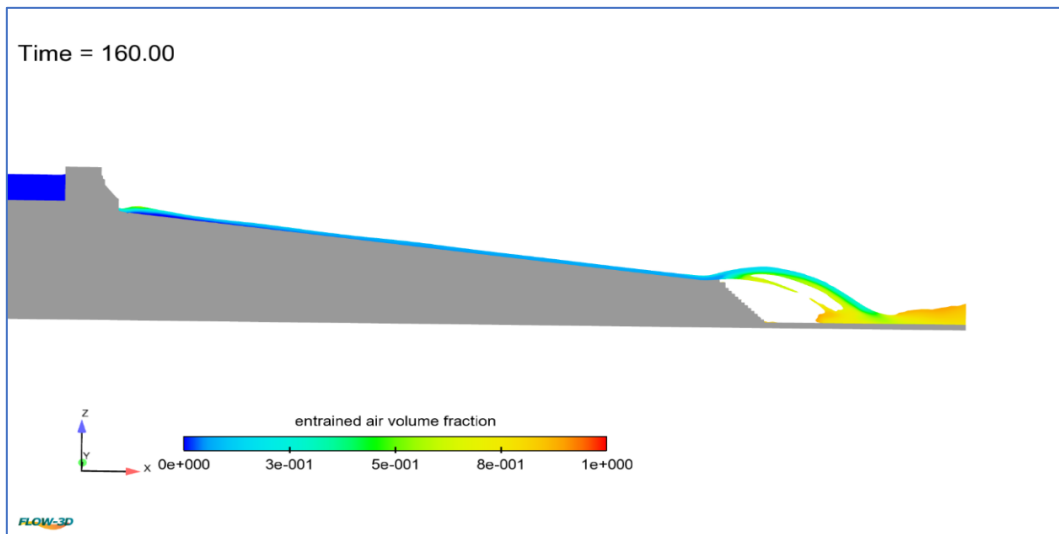
Şekil 10. Ogee Basınç Değerleri-Eksen

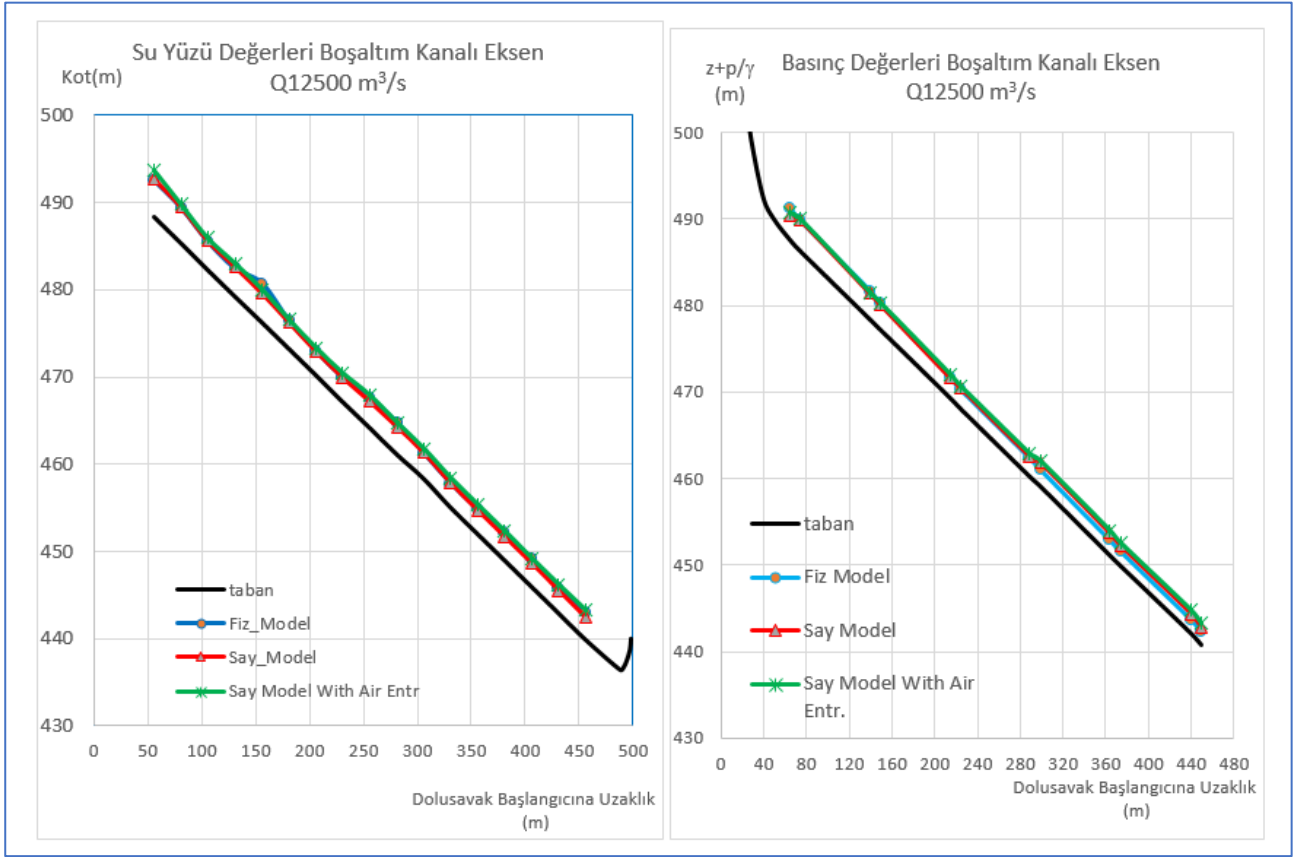


Şekil 11. Ogee Basınç Değerleri-Kenar



Şekil 12. Boşaltım Kanalı Basınç Değerleri-Eksen

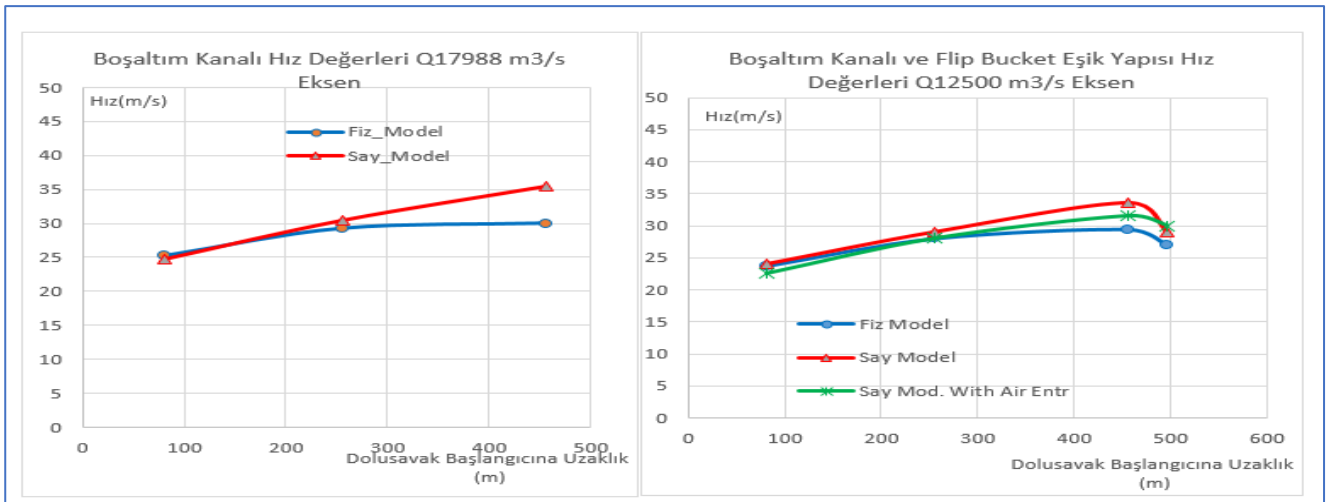
Şekil 13. a. Su Yüzü Değerleri Ogee Eksen ( $Q17988 \text{ m}^3/\text{s}$ ) b. Su Yüzü Değerleri Ogee Kenar ( $Q12500 \text{ m}^3/\text{s}$ )Şekil 14. Dolusavak Akıma Giren Hava Değerlerine Göre Sınıflandırma ve 2D Eksen Kesiti ( $Q12500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



Şekil 15. a. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri-Eksen b. Basınç Değerleri-Eksen (Q12500 m³/s)

Tablo 1. Boşaltım Kanalı Hız Değerleri Fiziksel Model &amp; Sayısal Model Karşılaştırma (Q12500 m³/s)

Nokta Eksen	X(Eksen) Fiziksel Model (m)	Fiziksel Model Hız Değerleri (m/s)	Sayısal Model Hız Değerleri (m/s)
1	81	23,7	22,5
2	256	28	29,2
3	456	29,4	33,7
4(eşik sonu)	496	27	29
Varyant-I (dış üstü)	496	26,3	29
Varyant-I (dış arası)	496	27,3	32
Varyant-II(dış üstü)	496	26,9	30
Varyant-II (dış arası)	496	27	31,5



Şekil 16. a. Boşaltım Kanalı Hız Değerleri 17988 m³/s b. Boşaltım Kanalı ve Flip Bucket Hız Değerleri (Q12500m³/s)

### 3.2 Varyant I, Varyant II (Slotted Bucket) ve Çevirmeli(Flip Bucket) Sıçratma Eşiğinin İncelenmesi

#### 3.2.1 Basınç ve Su Yüzü Değerleri

Bu bölümde sıçratma eşiğindeki varyantlarda elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Fiziksel modelde eşik içerisinde olmak üzere üç farklı noktada ölçümler yapılmıştır. Varyant-I tasarımının dış aralıkları Varyant-II'ye nazaran daha küçük, dış üst genişlikleri ise daha büyüktür. Dış aralığının büyümesiyle sıçrama sonrası sisteme sürüklenen hava girişinin artması amaçlanmıştır. Yapılan değişiklik sonrası fiziksel modellerde eşik içerisinde ikinci varyantın basınç miktarında artış gözlenirken su yüzü profillerinde dikkate değer değişiklik gözlenmemiştir. Basınç gibi su yüzü değerlerinde görülmeyen farkın nedeni fiziksel modelde kullanılan ölçek etkisi olabilir. Fiziksel modellerde eşik içerisinde artan basınçla birlikte sıçrama sonrasında sisteme daha fazla hava girişi gözlenmiş ve jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. İlgili durumların sayısal analizde de tespit edilmesi analizlerin kalitesini göstermesi açısından dikkat çekicidir. Air entrainment modeli kullanılmadan tanzim edilen sayısal analizlerde elde edilen sonuçlarda sıçratma eşiği yapısında su yüzü değerlerinin eşik içi çevrintide oluşan hava-su ilişkilerinden dolayı fiziksel model değerlerinden daha küçük, bu duruma paralel olarak sıçratma eşiğindeki basınç değerlerinde de tersi durumun olduğu tespit edilmiştir. Air entrainment modeli kullanıldığında su yüzü profillerinde fiziksel model değerlerinin üzerinde artış gerçekleşmiştir. Boşaltım kanalına kıyasla daha fazla artışın görülmesi de eşikteki çevrintiden kaynaklanmaktadır. Basınç değerleri ile ilgili olarak, Varyant-II tasarımında dış üstündeki değerlerinde bir miktar artış görülürken Varyant-I'de ise azalış kaydedilmiştir. Azalan ve artan değerlerin %5 seviyelerinde olması durumu da göz önüne alındığında yukarıda da değinildiği üzere air entrainment modelinin dolusavak boşaltım kanalı ve sıçratma eşiği dahil olmak üzere bu kısımlardaki hidrolik karakteristiklere etkisi nicel anlamda yoktur. Sıçratma eşiğindeki sayısal analizlerde eşiğin kavisli olduğu da göz önüne alındığında analizlerde kullanılan "blocked volume" ağ cinsinin elde edilen sonuçlara olumlu katkısı göz ardı edilemeyecektir (Şekil 17-21). Çevirmeli sıçratma eşiği (flipbucket) tasarımının fiziksel model sonuçları ile sayısal model sonuçları

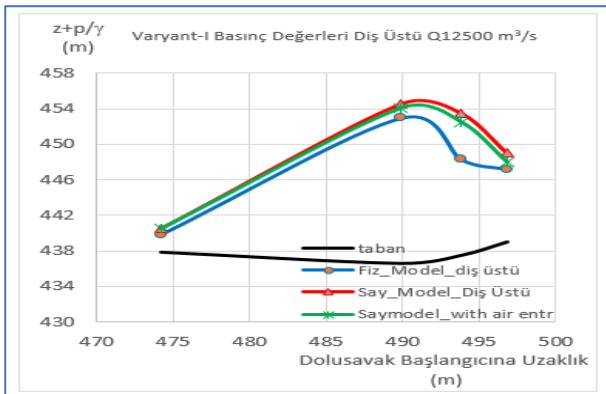
karşılaştırıldığında; fiziksel modelde elde edilen akış yüksekliğinin sayısal modele kıyasla akış hızı nedeniyle kurpta meydana gelen çevrinti etkisiyle oluşan hava sürüklenmesinden dolayı fazla olması beklenmektedir. Ancak su seviyelerinde sayısal model verileri daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca jet uzaklığı mesafesi hususunda fiziksel model jet profili daha uzağa sıçramıştır. Sıçrama mesafesinin uzak ve su seviyesinin düşük olması fiziksel modelde ölçek etkisine işaret etmektedir. Air entrainment modelinin kullanılmadığı 1/1 ölçekli sayısal modellerde diğer varyantlarda olduğu gibi elde edilen jet mesafelerinin fiziksel modellerden daha fazla olması beklenmektedir. Nitekim diğer varyantlarda da böyle bir durum gerçekleşmiştir. Katı geometrinin değiştiği eşikte, sıçratma eşiğinin kavisli olmasından dolayı sayısal model analiz programı tarafından yeterince algılanmadığından böyle bir durumun olduğu ihtimali de göz önüne alınarak ilgili durumun çözümü için devamındaki analiz çalışmalarında ağ boyutları yarıya indirilmişse de istenen sonuçlar elde edilememiştir. İlgili durumun çözümü için alternatif olarak eğrilikteki ağ blok sayısının artırılmasıyla eşiğin net olarak algılanacağı düşünülmüşse de yine beklenen durum gerçekleşmemiştir. Bu nedenle çevirmeli sıçratma eşiğindeki farklılığın nedeninin ölçek kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Dışlı tasarımlarda, dışların genişliği kanal genişliğinin yarısına sahip olduğundan çevirmeli sıçratma eşiğindeki ölçek etkisine rastlanmamıştır.

Fiziksel model çalışmalarında eşikte elde edilen su yüzü profilleriyle ilgili olarak, çevirmeli sıçratma eşiğinin su yüzü profillerinin varyantların su yüzü profilleriyle neredeyse aynı olması yine ölçek etkisine işaret ettiği, basınç değerlerinin farklı profile sahip olması da çalışma tarzı olarak çevirmeli sıçratma eşiğinin farklı olduğunu göstermektedir. Air entrainment modelinin çalıştırıldığı analiz sonuçlarına göre varyantlarda olduğu gibi su yüzü değerlerinde artış gözlenmiş, ancak basınç değerlerinde değişiklik neredeyse gözlenmemiştir (Şekil 22-23).

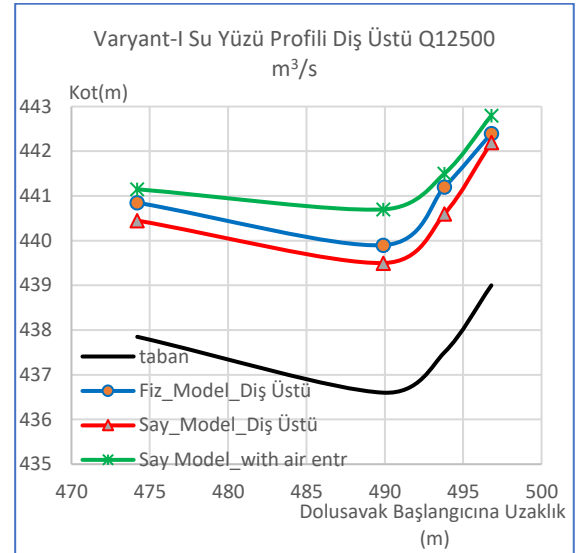
#### 3.3 Jet Profillerinin İncelenmesi

Orijinal projedeki çevirmeli (flip bucket) sıçratma eşiği ile yapılan fiziksel model deneylerinde Q12500 m<sup>3</sup>/s'lik debide sıçrayan su jetinin üst nap profilleri ölçümlerle bulunmuş ve şekillerde de verilmiştir. Fiziksel model deney sonuçlarına göre orijinal proje durumunda Q12500 m<sup>3</sup>/s'lik debinin

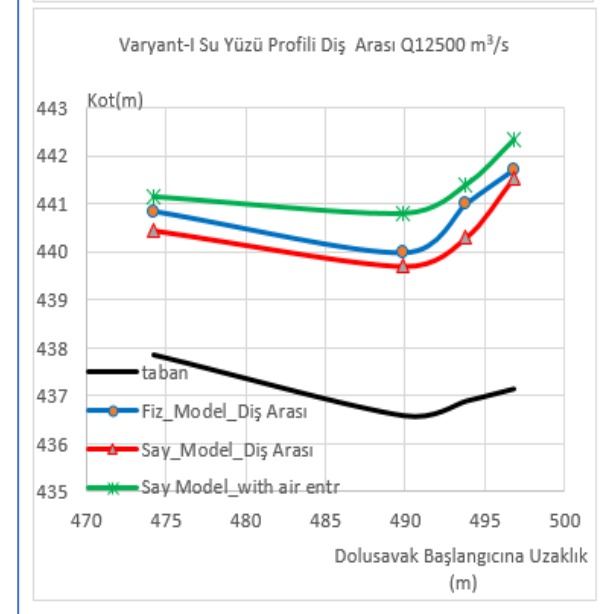
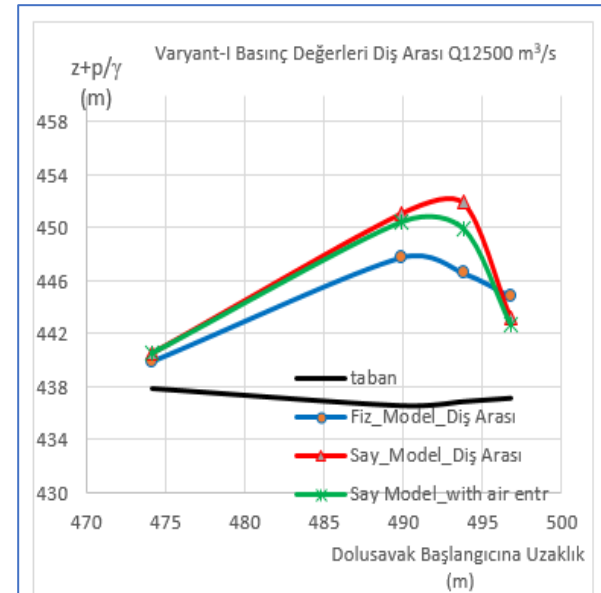
deşarjında sıçrayan su jeti sıçratma eşliğinden 151 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak ise 158 m, birinci dişli varyant durumunda Q12500 m<sup>3</sup>/s'lik debinin deşarjında sıçrayan su jeti sıçratma eşliğinden 148 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak ise 156 m, ikinci dişli varyantta ise aynı debide sıçrayan su jeti sıçratma eşliğinden 137 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak da 141 m mansaba düşmüştür. Su jeti profilleri açısından sıçratma eşiklerinin sayısal modelleri de gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar fiziksel model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre orijinal proje olan flip bucket eşliğinde su jeti sayısal model sonuçlarına göre 147 m mansaba düşerek fiziksel model değeri olan 151 m'ye kıyasla geride kalmıştır. Varyant-I tasarımında su jeti 154 m, Varyant-II tasarımında ise 145 m mansaba düşerek hava-su-ölçek etkisi ilişkilerinden dolayı fiziksel modele kıyasla beklendiği gibi daha uzak mesafeye mansaplanmıştır. Eşikten sonra basınç değerlerindeki sönümlenme en fazla Varyant-II de gözlemlenirken en az kırınım ise flip bucket' da gözlenmiştir. Bu sonuçlar fiziksel model çalışmalarının sonuçlarına da uygun olmakla birlikte fiziksel model çalışmalarında yer verilmeyen mansap kanalı tabanındaki basınç değerleri sayısal analiz yöntemi yardımıyla elde edilmiştir. Air entrainment modeli kullanıldığında ise jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. İlgili model varyantların sıçrama mesafesine %12 seviyelerinde etki ederken çevirmeli sıçratma eşliğine %5 seviyelerinde etki etmiştir. Dolayısıyla dişler sayesinde oluşan jet ayrılımlarına etkileyen hava sürüklenmesi miktarı çevirmeli yapıya göre iki kat daha fazla olmuştur (Şekil 24-25). Sisteme sürüklenen hava neticesinde kuyruk suyu tabanındaki basınç değerlerinde de önemli azalmalar görülmüştür Şekil(26-28).



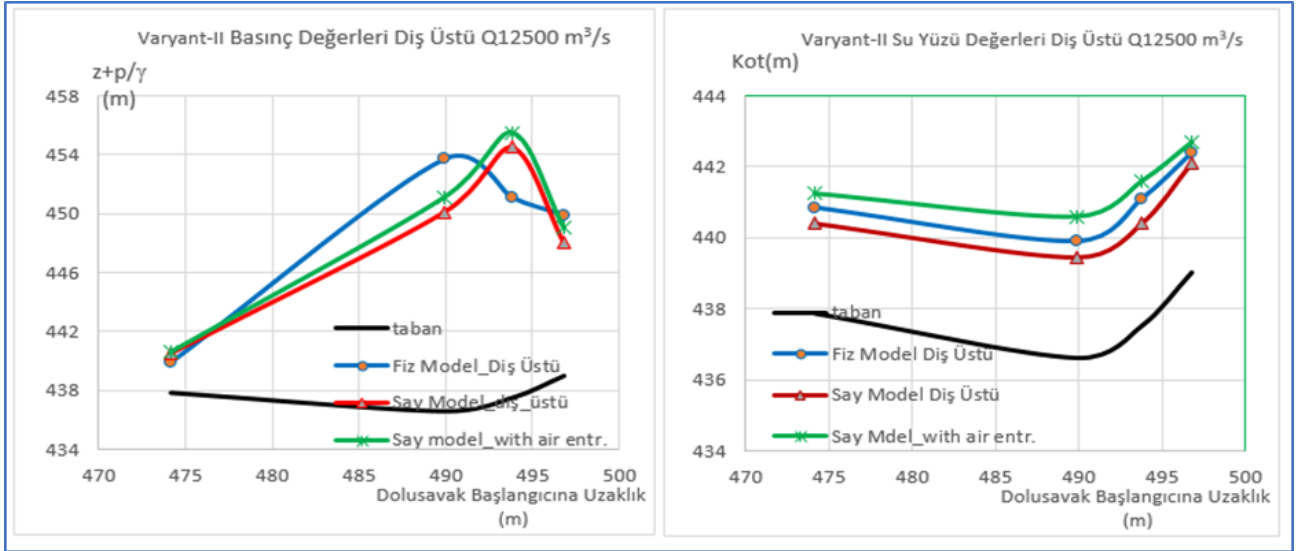
Şekil 17. Varyant-I Diş Üstü Basınç Değerleri



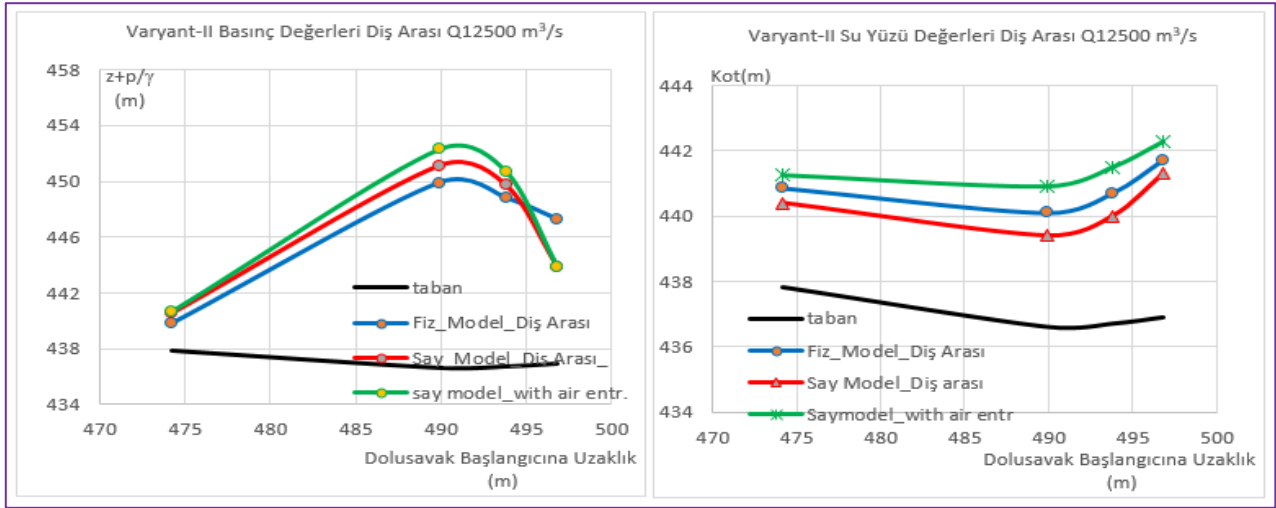
Şekil 18. Varyant-I Diş Üstü Su yüzü Değerleri



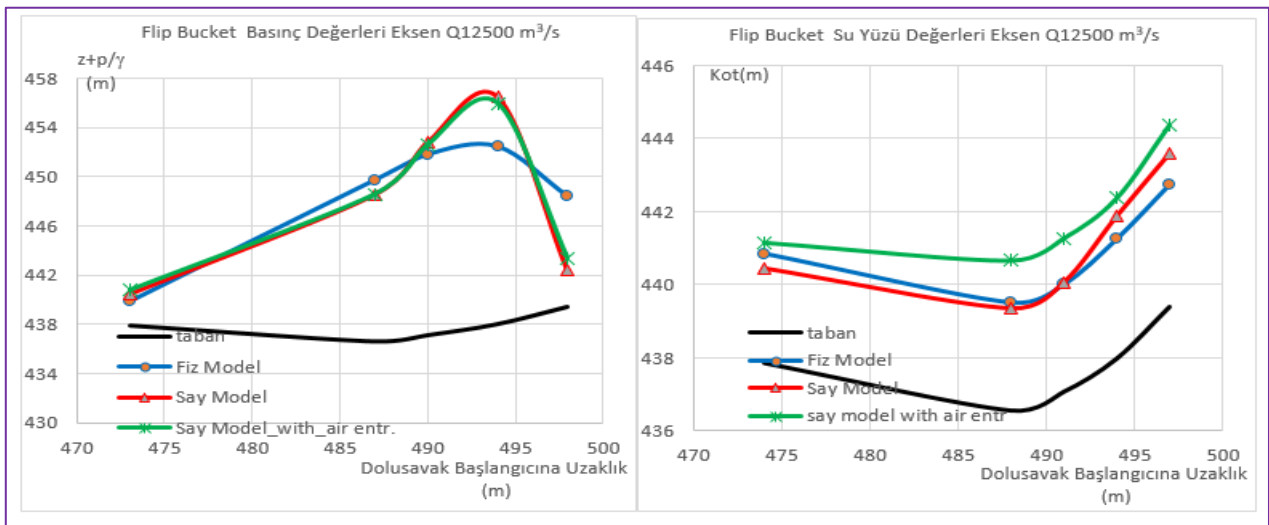
Şekil 19. Varyant-I Diş Arası Basınç ve Su Yüzü Değerleri



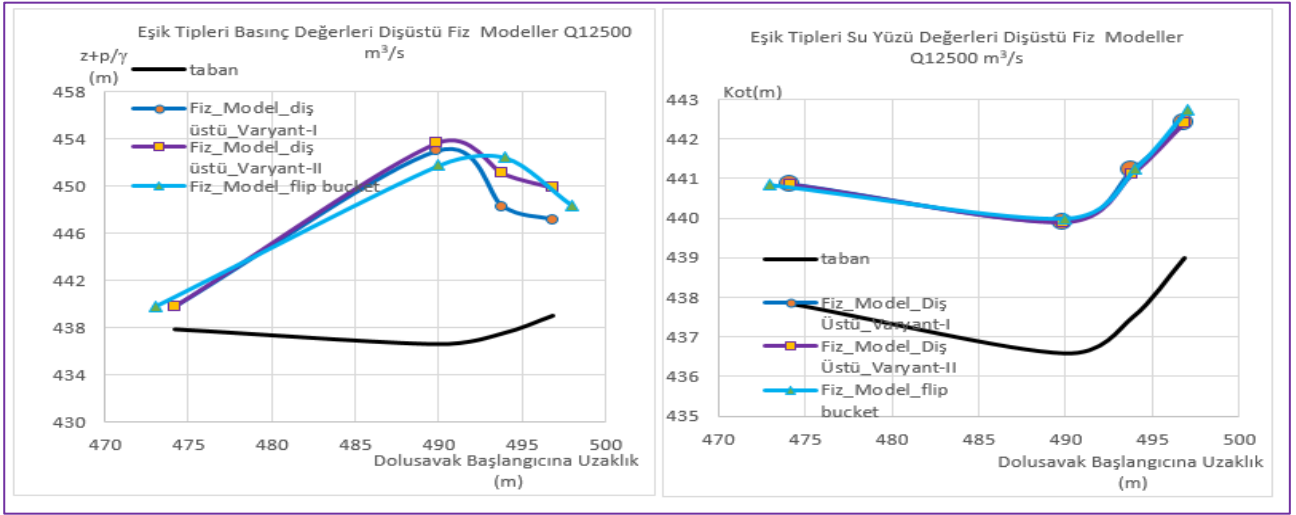
Şekil 20. Varyant-II Diş Üstü Basınç ve Su Yüzü Değerleri



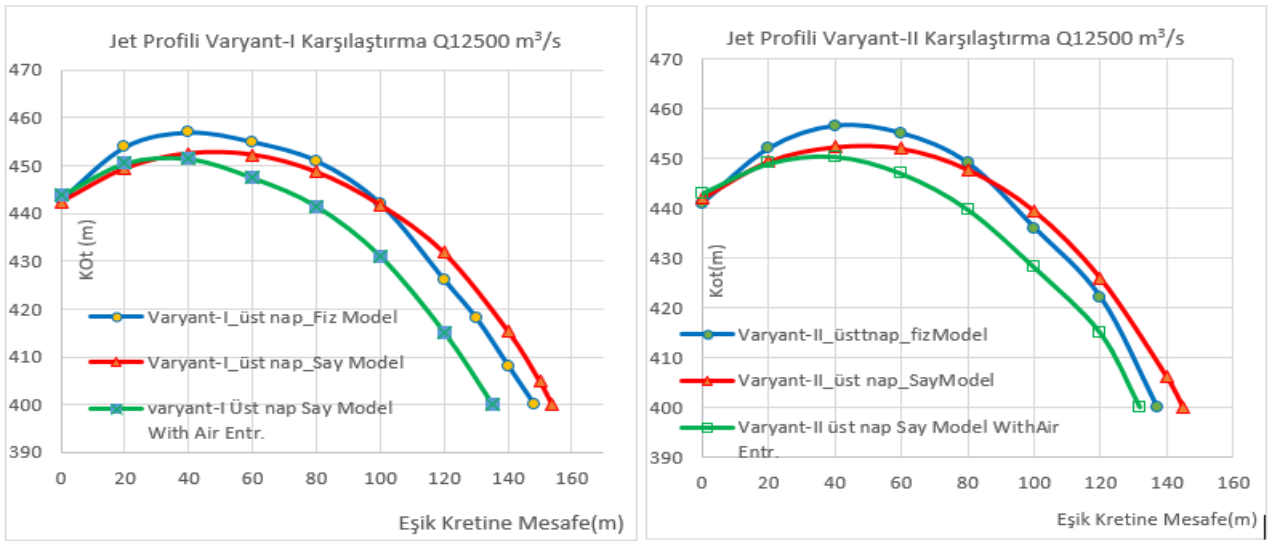
Şekil 21. Varyant-II Diş Arası Basınç ve Su Yüzü Değerleri



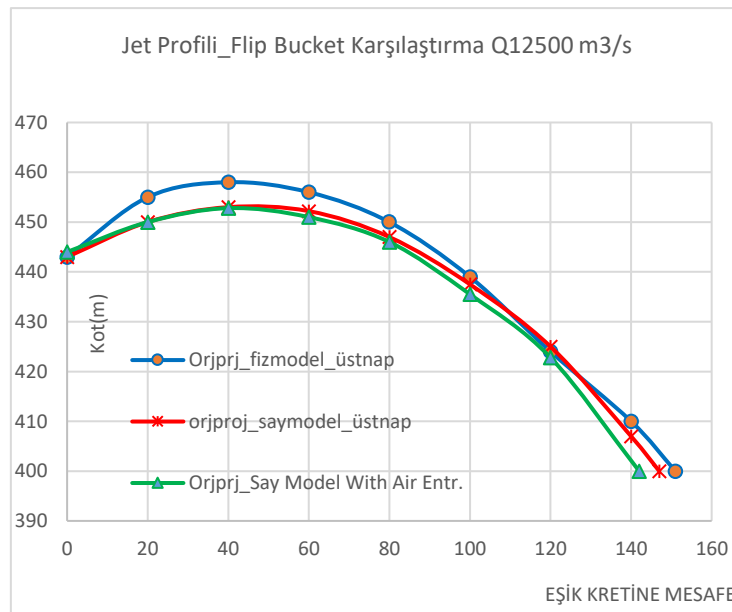
Şekil 22. Flip Bucket Eksen Basınç ve Su Yüzü Değerleri



Şekil 23. Sıçratma Eşik Tipleri Basınç ve Su Yüzü Değerleri Fiziksel Modeller

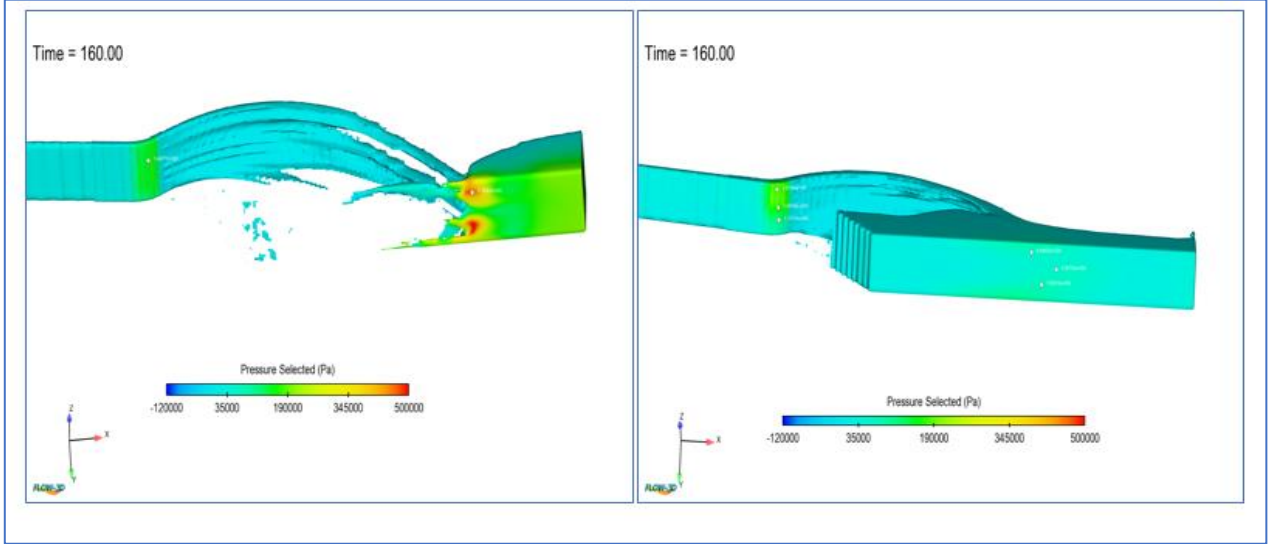


Şekil 24. Varyant-I ve Varyant-II Jet profilleri ( $Q12500 \text{ m}^3/\text{s}$ )

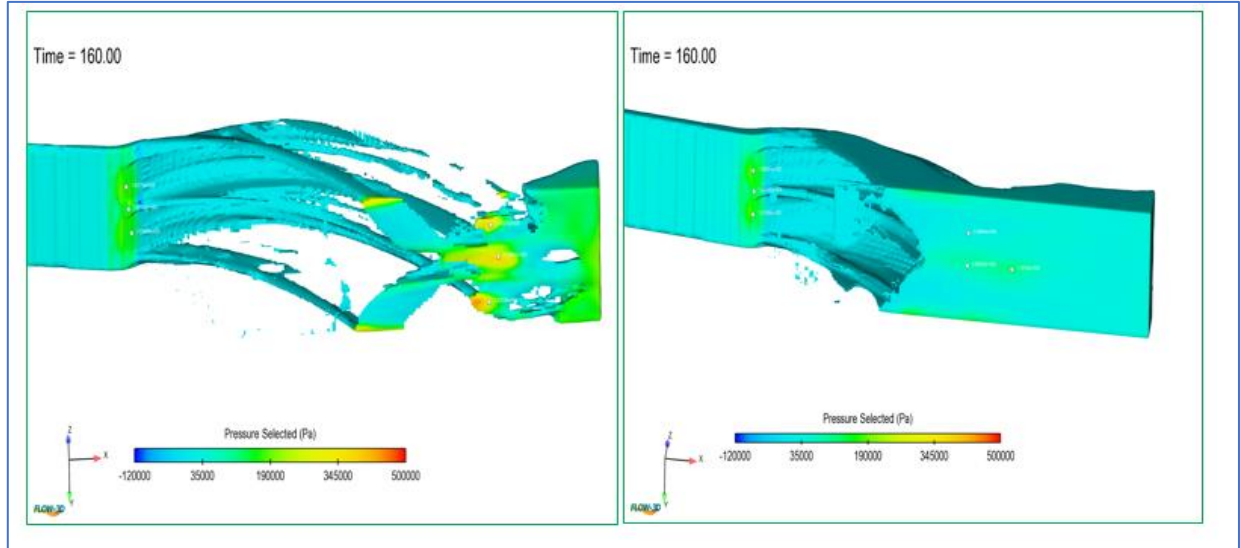


Şekil 25. Flip Bucket Jet profilleri ( $Q12500 \text{ m}^3/\text{s}$ )

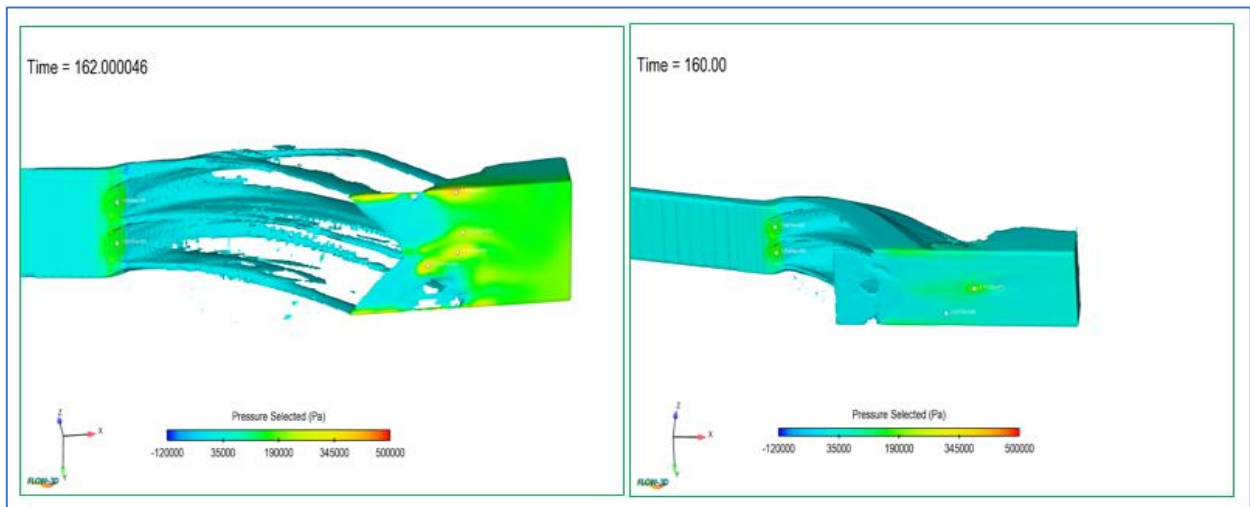




Şekil 26. Hava Sürüklenme Modeli Öncesi ve Sonrası Mansap Kanalı Tabanındaki Basınç Sınıflandırması ( $Q12500m^3/s$  Flip Bucket)



Şekil 27. Hava Sürüklenme Modeli Öncesi ve Sonrası Mansap Kanalı Tabanındaki Basınç Sınıflandırması ( $Q12500m^3/s$  Varyant-I)



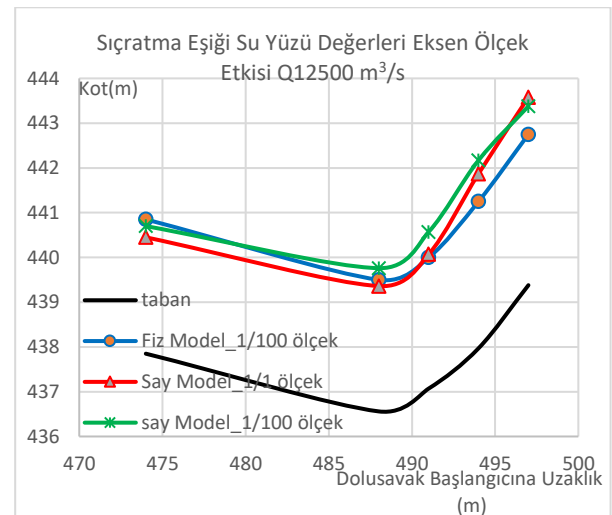
Şekil 28. Hava Sürüklenme Modeli Öncesi ve Sonrası Mansap Kanalı Tabanındaki Basınç Sınıflandırması ( $Q12500m^3/s$  Varyant-II)

### 3.4 Sayısal ve Fiziksel Modellerde Ölçek Hususu

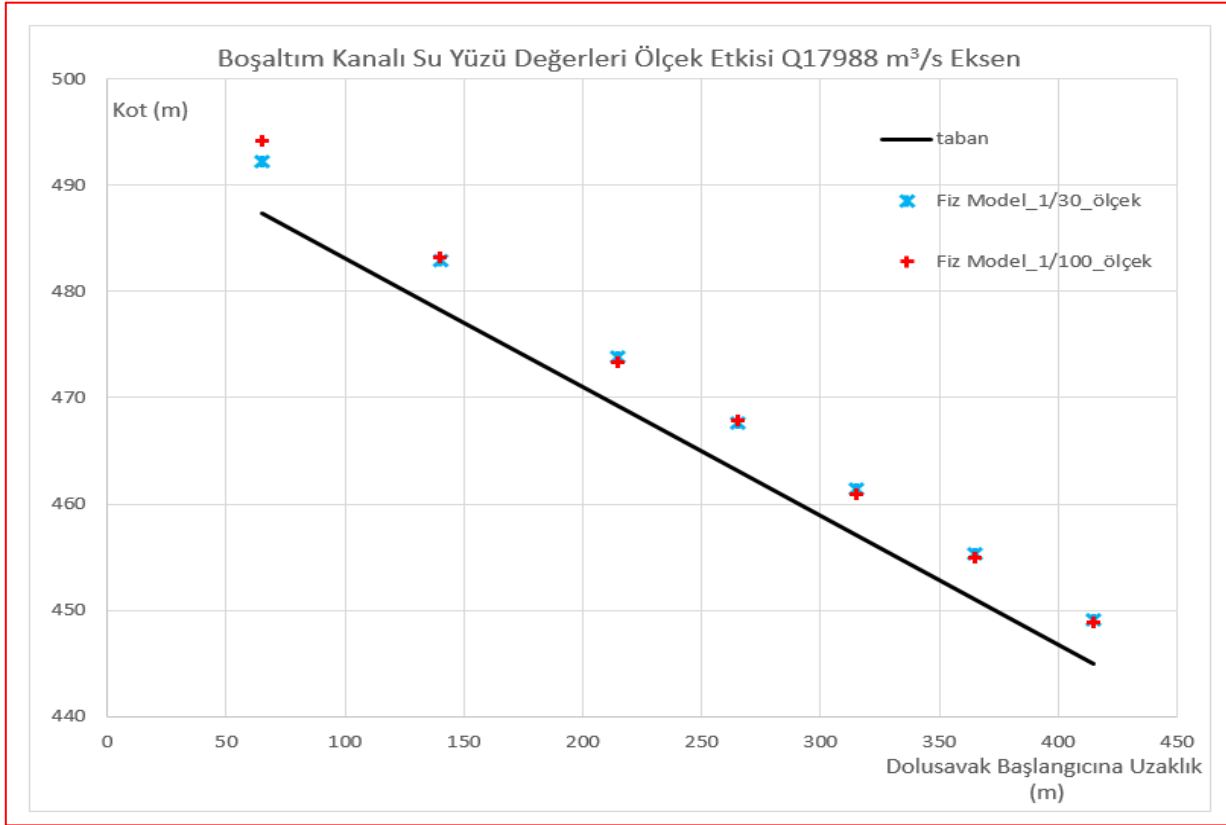
Çalışmamızın buraya kadarki kısmında sayısal analizlerimiz 1/1 (prototip) ölçek ile gerçekleştirilmiştir. Çünkü fiziksel model çalışmalarındaki Varyant-I ve Varyant-II dişli sıçratma eşiklerinin sayısal analizleri ile ilgili olarak; tanzim edilen 1/100 ölçekli varyant modellerinin Flow3D ile yapılan sayısal analizi için ihtiyaç olunan çözüm süresinin yaklaşık 55 gün olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma neden olarak, hem modelin 1/100 gibi oldukça küçük ölçeğe sahip olması hem de boşaltım kanalı sonundaki dişli yapı ve bu yapıda kullanılan “blocked to volume” ağ türü olmak üzere ilgili durumlar sayısal analiz süresini zaman/kaynak açısından oldukça olumsuz etkilemiştir. Daha önceki çalışmalarda araştırmacılarca da tespit olunan basınç ve su yüzü gibi hidrolik karakteristiklere ölçek etkisinin (özellikle 200’den küçük ölçek) neredeyse olmadığı hususu bilinmektedir (Kim, 2005; Usta, 2017). İlgili hususun tarafımızca da tespit edilmesi için 1982 yılında gerçekleştirilen 1/100 ve 1/30 ölçekli fiziksel model sonuçları göz önünde bulundurularak 1/30, 1/100 ve prototip ölçek(1/1 ölçek) modellerinin sayısal analizleri gerçekleştirilip gerek fiziksel ve sayısal model arasında gerekse de 30 ve 100 ölçekli fiziksel model arasındaki ölçek farkının etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre; 1/30 ölçekli fiziksel model sadece boşaltım kanalı için gerçekleştirilmiştir. Boşaltım kanalında 1/30 ölçekli fiziksel modellerde oluşan su yüzü değerleri ile 1/100 ölçekli model değerlerinin birbirleriyle uyumlu olmakla birlikte 30 ölçekli fiziksel modelin su seviyesi daha yüksek çıkmıştır. Ancak bu fark %10-15 seviyelerindedir. Söz konusu her iki ölçekli modeller sayısal olarak da çözümlenmiş ve ilgili sonuçlar arasında fark gözlenmemiştir. Yine tanzim edilen sayısal modellerde ölçek küçüldükçe boşaltım kanalı ve sıçratma eşğinde su yüzü değerlerinde artış gözlenirken, eşik sonrasında jet profil mesafesi kısalmıştır. Dolayısıyla kritik kısımlarda yani sıçratma eşiği ve sonrasında ölçek etkisinin ciddi boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Ölçek küçüldükçe yani 1/100 ölçekli sayısal model sonuçları aynı ölçekteki fiziksel model sonuçlarıyla boşaltım kanalı sonunda dahi neredeyse aynı olması hava-su ilişkileri de göz önüne alındığında olması gereken vaziyete aykırıdır. Çünkü küçülen geometri ile birlikte

sıçratma eşiği gibi kritik noktalarda akış daha az çevrintiye maruz kalıp daha uzağa fırlayacaktır. Ancak sıçratma eşğinde su seviyesi artmış ve sonrasında oluşan jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. Gelineen noktada sayısal modelde ölçek büyüdükçe sonuçların daha gerçekçi ve anlaşılabilir olduğundan su yüzü profilleri için sayısal modelde prototip ölçekte çözümlemenin daha doğru olacağı değerlendirilmektedir (Şekil29-33a).

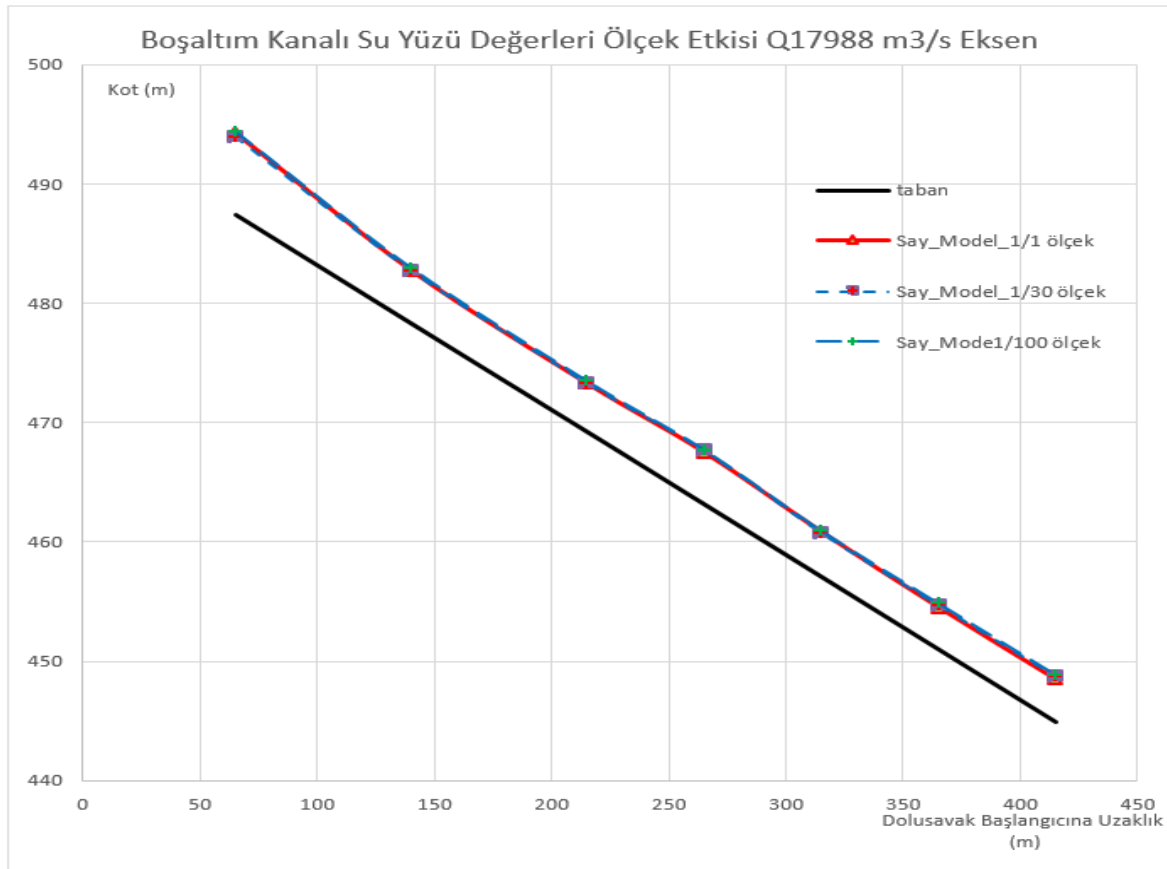
Basınç değerleri için ise yapılan analiz sonuçlarına göre ölçek etkisi ihmal edilecek düzeydedir. 30 ve 100 ölçekli fiziksel model sonuçları boşaltım kanalının ilk iki noktasında farklı olsa da kalan kısımlarda aynı değerler elde edilmiştir. 1/1, 1/30 ve 1/100 ölçekli sayısal modellerde elde edilen basınç değerleri birbirine yakın olup bu durum boşaltım kanalının hemen her noktası için geçerlidir. Aynı durum sıçratma eşiği için de geçerli olmuştur. Dolayısıyla fiziksel ve sayısal ölçekli modellerdeki ölçek etkisi yapılan incelemelerde basınç üzerinde olmadığı tespit edilmiştir. Ölçek etkisinin akış hızı üzerindeki durumu ile ilgili olarak; 1/30 ve 1/100 ölçekli fiziksel modellerde ölçek büyüdükçe boşaltım kanalında hız değerlerinde artışlar gerçekleşmiştir. Bu durumun nedeni geometrinin büyümesiyle akıştaban arasında sürüklenen havadan kaynaklı sürtünme gerilmelerinin azalmasıdır. Ancak bu fark ihmal edilecek düzeydedir. Yanı sıra sayısal modellerdeki hızların durumu ise ölçek büyüdükçe yani 1/100'den 1/1'e gelindikçe az önce değinilen sebepten kaynaklı hızlarda artışın olduğu görülmüş, özellikle prototip ölçekteki hızlar net bir şekilde 1/30 ve 1/100'den sıyrılmıştır (Şekil 33b-35).



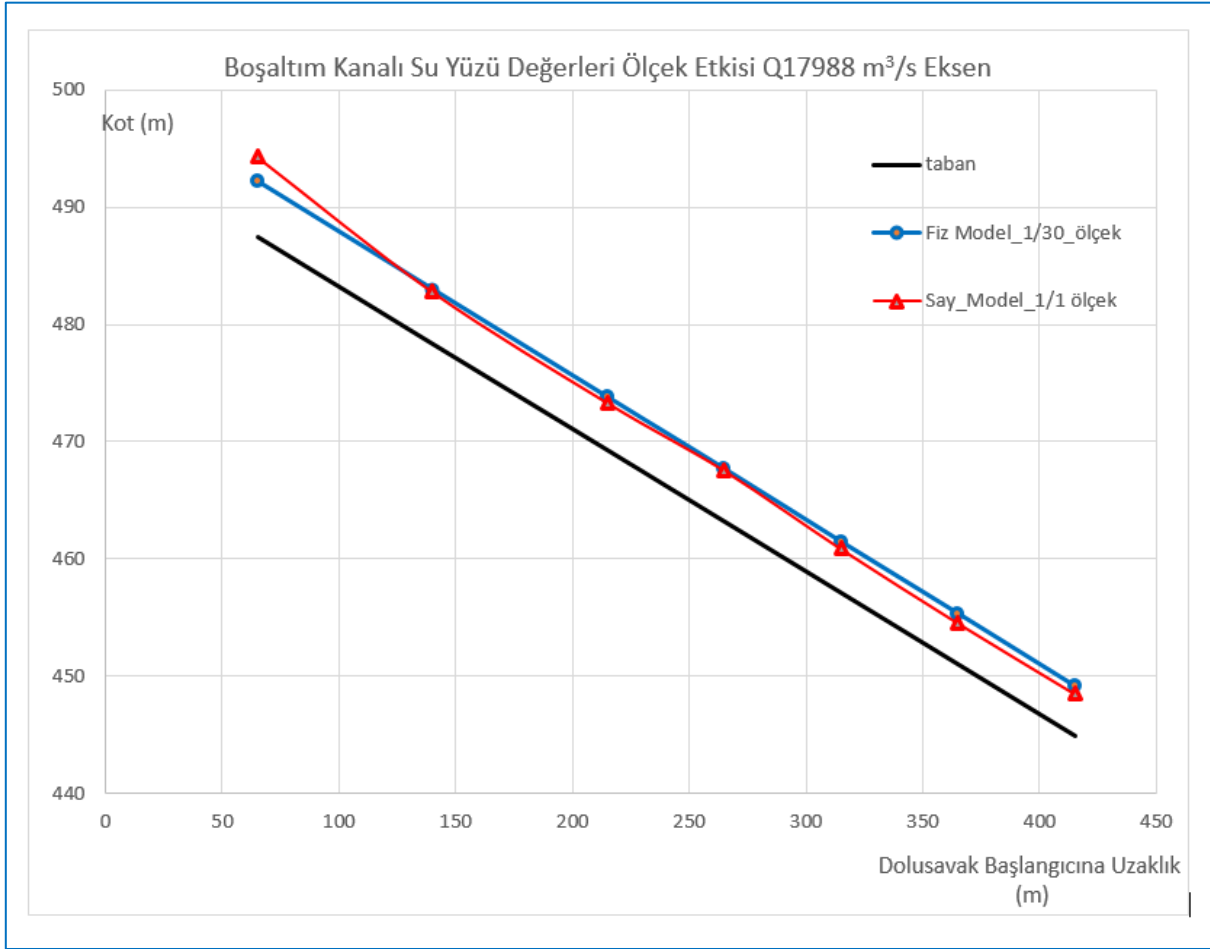
Şekil29. Sıçratma Eşiği(flip bucket) Su Yüzü Değerleri



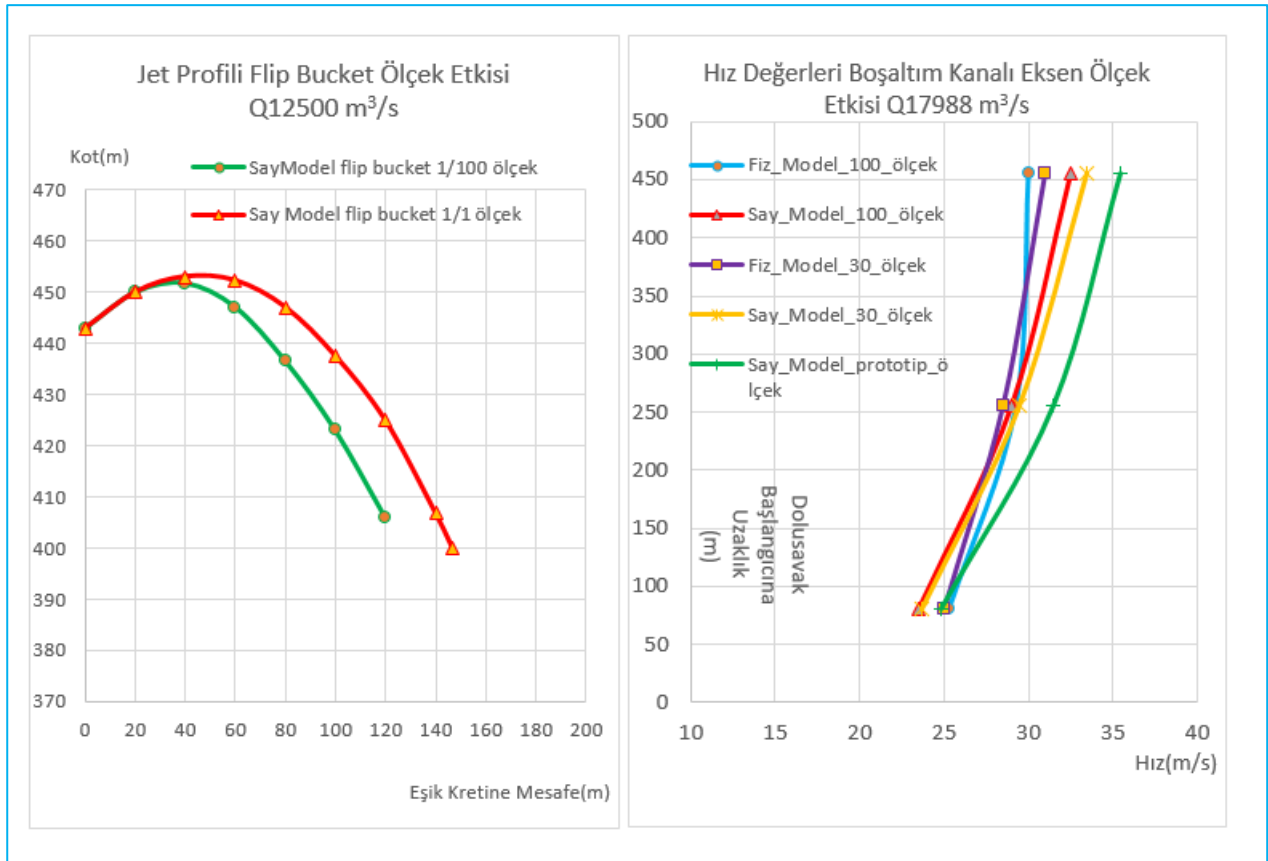
Şekil 30. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri Fiziksel Modeller Ölçek Etkisi Eksen



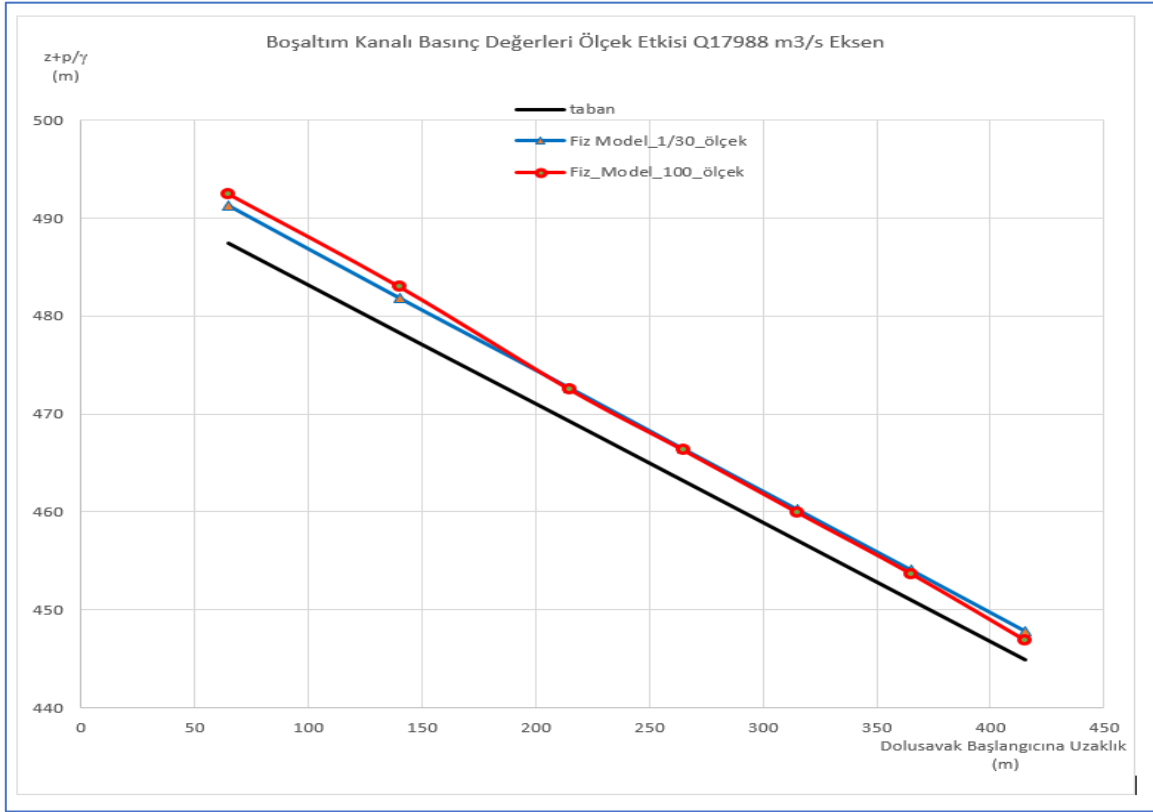
Şekil 31. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri Sayısal Modeller Ölçek Etkisi Eksen



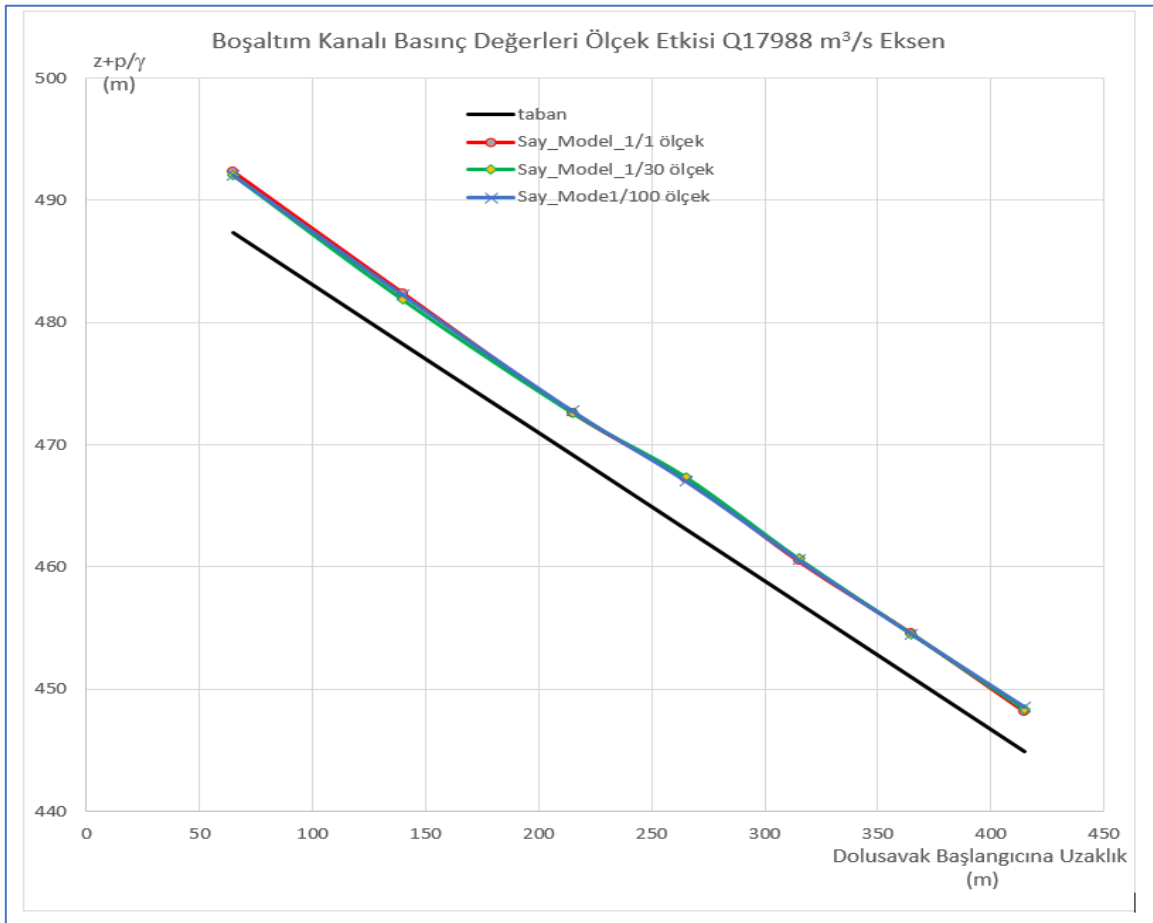
Şekil 32. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri Sayısal ve Fiziksel Modeller Ölçek Etkisi Eksen



Şekil 33. a.Boşaltım Kanalı Hız Değerleri b.Flip Bucket Jet profilleri Ölçek Etkisi



Şekil 34. Boşaltım Kanalı Basınç Değerleri Fiziksel Modeller Ölçek Etkisi Eksen



Şekil 35. Boşaltım Kanalı Basınç Değerleri Sayısal Modeller Ölçek Etkisi Eksen

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada baraj yapılarının taşkın sırasındaki güvenliğini sağlayan dolusavakların hidrolik karakteristiklerinin belirlenmesi konusunda sayısal çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar, DSİ 1982 yılı İlisu Barajı Dolusavak fiziksel model raporlarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Flow3D'nin kullanıldığı çalışmamızda ağ boyutlarının sonuçlara olan etkisi de göz önüne alınarak detaylı çalışma yapılmıştır. Analiz sonuçları dikkate alındığında fiziksel ve sayısal analizler arasındaki karşılaştırmada hidrolik karakteristiklere etki eden en güçlü hususun hava-su ilişkisi olduğu görülmüştür. Sayısal analizde kullanılan air entrainment modelinin dolusavak akışı üzerindeki hidrolik karakteristiklere etkimesi için enerji dengesinde güçlü değişimlere ihtiyaç duyması sayısal analiz yönteminin zayıf tarafını ortaya çıkarmıştır. Yine söz konusu her iki analiz yönteminde hidrolik karakteristiklere etkileyen diğer husus da ölçek konusudur. Açıklanan iki husus doğrultusunda sonuçlar aşağıya kısaca çıkarılmıştır. Buna göre;

Sayısal analizde debi miktarı fiziksel model verilerinden %3.2 daha fazla tahmin edilmiş, bu tahminin de literatür taramalarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Debiye kıyasla yüksek ağ çözünürlüğüne ihtiyaç duyan basınç değerleri konusunda, sayısal analiz sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının kritik noktalarda dahi birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Dolusavak boşaltım kanalında fiziksel modelde ölçeğin büyümesinin basınç değerleri üzerinde etkisinin olmadığı, aynı durumun sayısal analiz modellerinin farklı ölçekleri için de geçerli olduğu, air entrainment modelinin sayısal analizde çalıştırılmasıyla dolusavak ogee eşiği, boşaltım kanalı ve sıçratma eşiğindeki basınç değerleri üzerinde pek bir etkisinin gerçekleşmediği, ancak sıçratma eşiği sonrasında kuyruk suyu kanalı tabanında %60'a varan oranda basınçlarda düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Sıçratma eşiğinde denenen tasarımlarda kuyruk suyu kanalındaki taban basıncının en fazla olduğu tasarımın çevirmeli sıçratma eşiği, en az ise ikinci varyant olması hususlarının fiziksel model sonuçlarıncada da tasdik edilmesi ilgili sayısal analiz yönteminin güçlü yanını ortaya çıkarmıştır.

Su yüzü profilleri ile ilgili olarak, akış üzerindeki hava-su ilişkisi de göz önüne alındığında fiziksel ve sayısal analiz sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu, fiziksel modelde ölçeğin büyümesiyle boşaltım kanalı üzerindeki su seviyelerinde ortalama %12 oranında artışların gözlemlendiği, sayısal analizlerde ölçeğin küçülmesiyle boşaltım kanalı ve eşik yapısında su seviyesinde beklenen aksine artış, sıçratma eşiği sonrasında yine beklenen aksine jet profil mesafelerinde düşüş gözlemlendiğinden su yüzü profilleri için sayısal analizlerde prototip ölçekte (1/1 ölçek) analiz yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Yine sayısal analizdeki 1/1 prototip ölçek sonuçlarına göre çevirmeli sıçratma eşiğinde elde edilen su seviyesinin fiziksel model 1/100 ölçek seviyesinden daha fazla çıkması ve jet profilinin de daha kısa mesafeye ulaşması, ölçek konusunun geometrinin eğri-kavisli kısımlardaki etkisini ön plana çıkarmıştır. Dolayısıyla fiziksel model çalışmalarında kavisli kısımlardaki hidrolik karakteristiklerin daha sağlıklı elde edilebilmesi için model ölçek verisinin büyük tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Air entrainment modelinin kullanılmasıyla varyantlarda %10 oranında, çevirmeli eşikte ise %5 oranında sıçrama mesafesinin kısılmasına neden olduğu dikkate alındığında sisteme sürüklenen havanın artması için jet profillerinin parçalanması gerektiği görülmektedir. Enerji kırınımindaki etkili parametre olan jet profillerine etki eden hava sürüklenmesinin yanı sıra varyantlara kıyasla çevirmeli sıçratma eşiğine etki eden ölçek etkisi de dikkate alındığında İlisu Barajı Dolusavak yapısında enerji kırıcı olarak tercih edilen dişli sıçratma eşiği tasarımının oldukça yerinde bir karar olduğu görülmüştür.

Hız karakteristikleri konusunda fiziksel modellerde ölçeğin büyümesiyle hız artmışsa da bu artış oldukça sınırlı olmuştur. Sayısal analizlerde ölçeğin büyümesiyle hızlardaki artış fiziksel modele kıyasla daha fazla olmuştur. Sayısal ve fiziksel modellerde kanal sonu ve sonrası gibi kritik kısımlarda dahi aradaki farkın %10 seviyesinde olması sayısal analizin hız karakteristiklerinin tespiti konusunda başarılı olduğunu göstermektedir. 1/30 ve 1/100 fiziksel modellerde hızlar arasında dikkate değer farkın olmaması su ve taban arasında oluşan gerilmelerin dolusavak gibi yapılarda ihmal edilebileceğinin

önceki çalışmalarca ifade edilmesi sayısal analiz sonuçları ile desteklenmiştir. Ayrıca sayısal modellerde beklendiği gibi air entrainment modelinin hızları azaltıcı yönündeki etkisi oldukça sınırlı olmuştur.

## Teşekkür

Bu çalışma DÜBAP tarafından desteklenmiştir (DÜBAP, Proje No: MÜHENDİSLİK.20.007).

## 5.Kaynaklar

- [1] Z. Şen, Kur'an-ı Kerim ve Su Bilimi. İstanbul; Su Vakfı Yayınları, sayfa:264, 2006.
- [2] N. Ağırlioğlu, Baraj Planlama ve Tasarımı Cilt 1. İstanbul; Su Vakfı Yayınları, sayfa: 262, 2007.
- [3] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Design of Small Dams. Third Edition, pp: 339, 1987.
- [4] R. M. Khatsuria, Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. New York; CRC Press, 2005.
- [5] J. Gao, Z. P. Liu, ve J. Guo, "Energy Dissipation and High Velocity Flow Dam Construction in China - A Sixty-Year Review", China Water Power Press, 2014.
- [6] P. J. Mason, The choice of hydraulic energy dissipator for dam outlet works based on a survey of prototype usage. Proc. Instn. Civil Engineers, Part I. Vol 72, May 1982.
- [7] B. H. Rajan, K. N. Rao, "Design of trajectory buckets", Water and Energy International, Vol 37, pp 63-76, 1980.
- [8] R. Steiner, V. Heller, W.H. Hager, ve H-E. Minor, "Deflector ski jump hydraulics", J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 134, No. 5, pp. 562-571, 2008.
- [9] D. L. Vischer ve W. H. Hager, Dam Hydraulics. Wiley, Chichester, England and New York, 1998.
- [10] P. G. Chanel ve J. C. Doering, "An evaluation of computational fluid dynamics for spillway modelling", Proc. 16th AMFC, 1201-1206, 2007.
- [11] D. Ho, B. Cooper, K. Riddette ve S. Donohoo, "Application of Numerical Modelling to Spillways in Australia, in Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century", Berga et al (eds). Taylor and Francis Group, London, 951-959, 2006.
- [12] D. Gessler, "CFD Modeling of Spillway Performance", ASCE World Water and Environmental Resources Congress, 2005.
- [13] B. M. Savage & M. C. Johnson, "Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model

Case Study", Journal of Hydraulic Engineering, 127, No. 8, pp: 640-649, 2001.

[14] Ö. F. Dursun, M. Öztürk, "Basamaklı Dolusavakların Akımın Enerjisini Sönümleme Özelliğinin Sayısal Analizi", Engineering Sciences, 4(2):165- 174, 2009.

[15] H. Babaali, A. Shamsai & H. Vosoughifar, "Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes", Arab J Sci Eng 40, 381-395, 2015.

[16] D. Valero, G. B. Rafael, "Calibration of an Air Entrainment Model for CFD Spillway Applications", Adv. Hydroinform, 38, 571-582, 2016.

[17] E. Usta, "Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study", PhD thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.

[18] R. Daneshfaraz, A. Ghaderi, A. Akhtari and S. D. Francesco, "On the Effect of Block Roughness in Ogee Spillways with Flip Buckets", Fluids, 5(4):182, 2020.

[19] M. Zhenwei, Z. Zhiyan and Z. Tao, "Numerical Simulation Of 3-D Flow Field Of Spillway Based On VOF Method", 2012 International Conference On Modern Hydraulic Engineering, SciVerse ScienceDirect, Procedia Engineering, 28 808-812, 2012.

[20] S. Khani, M. A. Moghadam, and M. Nikookar, "Pressure Fluctuations Investigation on the Curve of Flip Buckets Using Analytical and Numerical Methods", Computational Research Progress in Applied Science & Engineering: An international Journal (CRPASE) - ISSN: 2423-4591. 03. 165-171, 2017.

[21] C. Yavuz, "Energy Dissipation Scale For Dam Prototypes", Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 105-116, 2022.

[22] M. C. Aydın, E. İkinciogulları ve M. E. Emiroğlu, "Şütlerdeki Enerji Kırıcı Blokların Akımın Hidrolik Karakteristikleri Üzerine Etkisinin Sayısal Analizi", Uluslararası Su ve Çevre Kongresi, SUCEV2018 Bildiriler Kitabı, Bursa, 22-24 Mart 2018.

[23] DSİ, Ilısu Barajı ve HES İnşaatı Rehber Projeleri, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2010.

[24] S. Okyay, Ilısu Barajı Dolusavak Model Raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Yayın no: Hİ-715, Model no: M-192, Ankara, s: 110, 1982.

[25] Flow3D, Flow3D User Manual, v11.2. Flow Science Inc, 2014.