BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ | Cilt : 27 Sayı : 2 Temmuz 2025

Balıkesir Üniversitesi FBE Dergisi

Yazışma Adresi:
BAUN FBE Dergisi, Balıkesir Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, 10145 Çağış / Balıkesir
Telefon : (266) 612 10 77

http://fbed.balikesir.edu.tr
fbedergi@balikesir.edu.tr

Balıkesir Üniversitesi FBE Dergisi

Balıkesir Üniversitesi FBE Dergisi

ISSN : 1301-7985
e-ISNN : 2536-5142

Balıkesir Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Cilt:27 Sayı:2 Temmuz 2025

JOURNAL OF BALIKESIR UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Volume : 27 Number : 2 July 2025

fbedergi@balikesir.edu.tr

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Cilt 27 Sayı 2 Temmuz 2025

ISSN 1301-7985
eISSN 2536-5142

Journal of Balikesir University
Institute of Science and Technology

Volume 27 Number 2 July 2025

ISSN 1301-7985
eISSN 2536-5142

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

Sahibi Balıkesir Üniversitesi Adına Prof. Dr. Yücel OĞURLU
Balıkesir Üniversitesi Rektörü

Baş Editör

Prof. Dr. Dilek TÜRKER — Balıkesir Üniversitesi

Editör Kurulu

Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ — Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Sümeyye AYDOĞAN TÜRKOĞLU — Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Taner ÖZCAN — Balıkesir Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Simge SERTKAYA KÖYBAŞI — Balıkesir Üniversitesi

Alan Editörleri

Prof. Dr. Fırat EVİRGEN — Balıkesir Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin KÜÇÜKÖZER — Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Kaan TÜRKER — Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Nuray GEDİK — Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Tuğba KESKİN GÜNDOĞDU — İzmir Demokrasi Üniversitesi

Dr. Haris NALAKATH ABUBACKAR — Instituto De Tecnologia Química E Biológica António Xavier ITQB NOVA

Danışma & Yayın Kurulu

Prof. Dr. Murat Erhan BALCI — Balıkesir Üniversitesi

Prof. Dr. Ali ORAL — Balıkesir Üniversitesi

Prof. Dr. Muhammed ATAMANALP — Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Burhanettin FARİZOĞLU — Balıkesir Üniversitesi

Prof. Dr. Akram BEGMATOV — Belarusian-Uzbek Intersectoral Institute of Applied Technical Qualifications

Prof. Dr. Kemal YÜRÜMEZOĞLU — Dokuz Eylül Üniversitesi

Prof. Dr. Bedriye ASIMGİL — İzmir Demokrasi Üniversitesi

Prof. Dr. Gaye BİROL	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Prof. Dr. S.s.s. SARMA	Universidad Nacional Autónoma de México
Prof. Dr. Derya BOSTANCI	Ordu Üniversitesi
Prof. Dr. Savaş YILMAZ	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Makhsud BOBOJANOV	Tashkent State Technical University Named After Islam Karimov
Prof. Dr. Baybars Ali FİL	Balıkesir Üniversitesi
Doç. Dr. Sema ÇARIKÇI	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman UZUNER	Balıkesir Üniversitesi
Dr. Özge BÜYÜKDAĞLI	International Unıversity Of Sarajevo

Sekretarya

Arş. Gör. Harun Mert İLBEYLİ	Balıkesir Üniversitesi
Arş. Gör. Tuba MUMCU	Balıkesir Üniversitesi

Mizanpaj&Yayın Editörü

Arş. Gör. Dr. Serhad ONAT	Balıkesir Üniversitesi

Yazışma Adresi: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çağış Yerleşkesi 10145, Balıkesir
Tel: (0266) 612 10 77 Faks: (0266) 612 10 78
Elektronik Posta: fbedergi@balikesir.edu.tr
İnternet Adresi: http://fbed.balikesir.edu.tr

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

AMAÇ VE KAPSAM

Balıkesir Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisinin amacı; Fen bilimleri, Mühendislik bilimleri ve Fen-Matematik Eğitimi alanlarında yapılan özgün araştırma makaleleri, kısa makaleleri, derlemeleri bu alanlarda saygın akademik bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlamaktır.

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, bilimsel ve hakemli bir dergi olup 1999 yılından bu yana yılda iki kez (ocak ve temmuz aylarında) düzenli olarak yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe ve İngilizcedir.

YAYIM İZNİ

Bireysel kullanım dışında, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi'nde yayımlanan makaleler ve bu makalelerde yer alan şekiller ve tablolar yazılı izin olmaksızın çoğaltılamaz. Bilimsel makalelerde akademik usullere uygun atıf yapılmak sureti ile alıntı yapılabilir.

YAZILARIN BİLİMSEL VE HUKUKİ SORUMLULUĞU

Yayımlanan yazıların bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazarlarına aittir. Editör, Yardımcı Editörler ve Yayın Kurulu üyeleri dergideki hatalardan veya kullanımından kaynaklanan sonuçlardan dolayı sorumluluk kabul etmez.

Yazışma Adresi: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çağış Yerleşkesi 10145, Balıkesir
Tel: (0266) 612 10 77 Faks: (0266) 612 10 78
Elektronik Posta: fbedergi@balikesir.edu.tr
İnternet Adresi: http://fbed.balikesir.edu.tr

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Derleme Makalesi / Review Article

Bionanocomposite films and coatings: current applications in advanced technology

Biyonanokompozit filmler ve kaplamalar: gelişen teknolojideki mevcut uygulamaları 411-424

Yasemin TORLAK

Elektrokoagülasyon yöntemiyle atık sularının arıtımı: etkinlik, modelleme ve kontrol yaklaşımları

Treatment of wastewater by electrocoagulation: efficiency, modeling and control approaches 425-442

Dursun Alp KIZILÖZ, Metin DEMİRTAŞ

Antibiyofilm aktivitenin değerlendirilmesinde kullanılan in vitro-statik testler

In vitro-static tests used to evaluate antibiofilm activity 762-779

Simay ALDAĞ, Ayşenur YAZICI

Araştırma Makalesi / Research Article

Investigation of the environmental consciousness levels of teachers and administrators in Bitlis Province

Bitlis ilindeki öğretmenler ve yöneticilerin çevre bilinci düzeylerinin incelenmesi 443-463

Hatice KANBUR, İbrahim KOÇ

Diophantine equations on cross-multiplicative forms of the Pell and Pell-Lucas numbers

Pell ve Pell-Lucas sayılarının karşılıklı çarpımsal eşitlikleri ile ilgili Diophantine denklemleri 464-474

Ahmet EMİN, Ahmet DAŞDEMİR

Prediction of notch strength ratio of a notched tensile ductile iron using multiple linear regression model

Sünek dökme demirde çentik mukavemet oranının çoklu doğrusal regresyon modeli ile tahmini 475-487

Gülcan TOKTAŞ

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

Biyomimetik tasarım yaklaşımının parametrisizm manifestosu kapsamında değerlendirilmesi

Evaluation of the biomimetic design approach within the framework of the parametricism manifesto 488-500

Sibel MACİT İLAL

Bulanık ikili esnek küme yardımıyla karar verme problemine matematiksel bir yaklaşım

A mathematical approach to decision making problem with the fuzzy binary soft set 501-518

Nihal TAŞ , Anıl PEKER

Generation of regular waves with FPGA based controller in a wave channel

Bir dalga kanalında FPGA tabanlı kontrolör ile düzenli dalgaların üretimi 519-536

Batın DEMİRCAN, Sabri BIÇAKÇI

Betonarme binaların deprem performanslarının hızlı değerlendirilmesi için P25 metodunun geliştirilmesi ve Balıkesir uygulaması

Development of the P25 method for the rapid seismic assessment of reinforced concrete buildings and its application in Balıkesir 537-558

Barış ÖZKUL, Atılay KAYA

Investigation of paraoxonase1 enzyme activity and Q/R 192 polymorphism in severe COVID-19 cases

Ağır COVID-19 geçiren hastalarda paraoksonaz1 enzim aktivitesinin ve Q/R 192 polimorfizminin araştırılması 559-568

Merve ARSLAN, Kübra ÇIKRIKÇI, Adem ERGÜN, Oktay ARSLAN

Classification of news about Turkey in the foreign press through text mining

Metin madenciliği ile Türkiye'nin yabancı basındaki imajının analizi 569-586

Murat ISIK, Emrah AYDEMİR

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

Geri dönüşüm makinelerinde kullanılan kesme silindirinin elastik davranışının parametrik korelasyon yöntemi ile analizi ve optimizasyonu 587-608

Analysis and optimization of elastic behavior of cutting cylinder used in recycling machines with parametric correlation method

Özer ÖĞÜÇLÜ, Oğuz Emrah TURGUT

Üleksit, kolemanit, klinoptiloit zeolitli sıvaların radyoaktif ışınım soğurumu, basınç mukavameti, ısı yalıtımı ve antibakteriyel özelliklerinin karşılaştırılması 609-625

Comparison of radioactive radiation absorption, compressive strength,thermal insulation and antibacterial properties of ulexite, colemanite, clinoptiloite zeolite plasters

Ali Deniz KÜÇÜKÖZER, Tuana KAYA, İrem YALÇIN, N. Sibel ÖZATLI

Effect of line-width parameter on the tensile strength, surface profile and printing time of 3D printed PLA parts 626-638

Hat-genişliği parametresinin 3B yazdırılmış PLA parçaların çekme mukavemeti, yüzey profili ve yazdırma süresi üzerindeki etkisi

Ahmet Çağrı KILINÇ

Yapay zeka teknolojisi ile tüp bebek tedavisinde fiziksel özellik seçimine yönelik bir yazılım ve cihazı geliştirilmesi 639-653

Development of a software and device for physical feature selection in vitro fertilization treatment with artificial intelligence technology

Tuçe KUREŞ , Aydın ŞIK

An alternating inertial forward-backward-forward algorithm for solving monotone inclusion problem and its applications 654-666

Monoton kapsama problemini çözmek için alternatif eylemsiz ileri-geri-ileri ayırma algoritması ve uygulamaları

Ebru ALTIPARMAK

Chromatic indices of finite affine & projective planes and their duals 667-680

Sonlu Afin & Projektif düzlemlerin ve duallerinin kromatik indisleri

Abdurrahman DAYIOĞLU, Fatma ÖZEN ERDOĞAN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

The role of academic self-efficacy in pre-service mathematics and science teachers' use of generative artificial intelligence tools

Matematik ve fen bilgisi öğretmen adaylarının üretken yapay zeka araçlarını kullanmalarında akademik öz yeterliğin rolü 681-704

Caner BÖREKCİ , Nihat UYANGÖR

Afyon Zonu Kuzeybatısındaki (Tava Dağı/Çavdarhisar/Kütahya) metamorfik kayaçların kinematik özellikleri

Kinematic properties of metamorphic rocks in the northwest of the Afyon Zone (Tava Mountain/Çavdarhisar/Kütahya) 705-718

Ali Kamil YÜKSEL, Meral YILMAZ

Seyhan Havzası'nda düşük akımların analizi

Low flow analysis in the Seyhan Basin 719-735

Selman BAYSAL, S. Utku YILMAZ, F. Sencer KAÇAR, Bihrat ÖNÖZ

A fast and reliable numerical approach for solving lake pollution problem

Göl kirliliği probleminin çözümü için hızlı ve güvenilir bir sayısal yaklaşım 736-749

Sevin GÜMGÜM

Sürdürülebilir ürün gelişim modellemesi: Gıda sanayinde gökkuşağı alabalığı (Oncorhynchus mykiss) fileto atıklarından sos eldesi

Sustainable product development modelling: Obtaining sauce from rainbow trout (Oncorhynchus mykiss)fillet waste in the food ındustry 750-761

Tuba FİDANCİ AKBEY , Ayşe KARA, Gonca ALAK

Mimari tasarımda kullanıcı-tasarımcı iş birliğine dayalı bir yaklaşım: Bilim ve sanat merkezleri örneği

An approach based on user-designer collaboration in architectural design: The example of science and art centers 780-801

Sümeyye Aybike TÜRK , Reyhan MİDİLLİ SARI

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

Trends in research on out-of-school learning environments in mathematics education: A systematic review

802-823

Matematik eğitiminde okul dışı öğrenme ortamlarına yönelik yapılan çalışmaların eğilimleri: Bir sistematik derleme çalışması

Enes Fatih EĞE, Hasan TEMEL, Devrim ÜZEL

DOI:10.25092/baunfbed. 1473620 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 411-424, (2025)*

Bionanocomposite films and coatings: current applications in advanced technology

Yasemin TORLAK*

Department of Agricultural and Livestock Production, Cal Vocational High School, Pamukkale University, Denizli, 20700, TURKEY

Geliş Tarihi (Received Date): 25.04.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 10.02.2025

Abstract

Polymers, which are suitable for use for various purposes, are decorative, chemically inert and corrosion-free, have long periods of destruction in nature and are generally known as chemically produced substances, have gained importance in green chemistry and green production. Composite materials are obtained by combining materials such as natural biopolymers or synthetic biodegradable polymers, inorganic or organic nanomaterials, nanoscale minerals with different materials. The aim of this review is to briefly investigate the biopolymers used in the production of composite materials and the film coating techniques related to these materials, to determine what can be done for the future, and to reveal the environmental importance of the use of biopolymers as binders of composite materials that can be produced in the future.

Keywords: *Biocomposite, biodegradable polymer, film coating*

Biyonanokompozit filmler ve kaplamalar: gelişen teknolojideki mevcut uygulamaları

Öz

Çeşitli amaçlarla kullanıma uygun, dekoratif, kimyasal olarak inert ve korozyona uğramayan, doğada uzun süre yok olan ve genel olarak kimyasal olarak üretilen maddeler olarak bilinen polimerler, yeşil kimya ve yeşil üretimde önem kazanmıştır. Kompozit malzemeler, doğal biyopolimerler veya sentetik biyobozunur polimerler, inorganik veya organik nanomalzemeler, nano ölçekli mineraller gibi malzemelerin farklı malzemelerle birleştirilmesiyle elde edilir. Bu derlemenin amacı, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan biyopolimerleri ve bu malzemelerle ilgili film kaplama tekniklerini

* Yasemin TORLAK, torlak@pau.edu.tr, http://orcid.org/0000-0001-5964-2532

kısaca araştırmak, geleceğe yönelik neler yapılabileceğini belirlemek ve biyopolimer kullanımının çevresel önemini ortaya koymaktır.

Anahtar kelimeler: *Biyokompozit, biyolojik olarak parçalanabilen polimer, film kaplama*

.

1. Introduction

Biomaterials science is one of the branches of science where great progress has been made in recent years and detailed research has been concentrated. Compared to previous years, natural materials produced from materials such as wood, glue and rubber, gold, iron, glass and zinc have been used for biomaterial purposes to bring new life forms to living tissues. In the last decade, serious progress has been made in the development of new materials to understand the interaction of materials with biological systems. Biomaterials are materials of natural or synthetic origin used to increase or support the functionality of living tissues that have lost their function in the human body [1,2]. Contrary to their high potential and properties, industrial polymers create pollution as they cannot be destroyed through a natural process and can only be disposed of as a result of costly degradation processes. However, the fact that they are obtained from exhaustible resources such as petroleum resources has led to new searches in terms of sustainability and environmental harmony in the polymer industry.

Biopolymers have come to the fore as alternative materials in many areas, especially in the packaging industry, as a result of the disadvantages of industrial polymers such as being obtained from exhaustible resources and being difficult to dispose of. They obtained from natural and sustainable sources have properties equivalent to those of industrial polymers, thanks to their mechanical and thermal properties [3–5].

Characterization techniques bionanocomposite materials are divided into four. The first of these characterization techniques is microscopy-based characterization techniques. They are scanning electron microscope, transmission electron microscope, atomic force microscope and scanning tunneling microscope. The second is X-ray related characterization techniques. This category also includes X-ray diffraction and X-ray photoelectron spectroscopy. The third and fourth characterization techniques of bionanocomposite materials are spectroscopic techniques, namely UV-VIS spectrophotometry, Raman/FT-IR spectroscopy [6].

In the production of bionanocomposite films, natural or synthetic biodegradable polymers are generally preferred. The properties and applications of bionanocomposite-coated films depend on the nanoscale material's characteristics. In previous studies, in the production of films coated with bionanocomposite, the structures were determined by molecular arrangement, reaction activity. Natural polymers are divided into classes based on functional groups, bonding properties, thermal behavior, and solubility in different solvents. Materials such as some natural minerals and clay minerals have also been preferred recently. Studies have been conducted with these minerals in different disciplines.

In this review, we focused on the different properties of bionanocomposites and different characterization techniques for analysis, and discussed the latest developments in both technical and scientific matters for the applications of bionanocomposites. Additionally, this article aims to review studies on the formation of polymer-based nanocomposite coating films and their properties.

Most of the synthetic polymers used today are petrochemical products and are not biodegradable. Therefore, when socioeconomic life is considered, the production of degradable plastics instead of conventional plastics is an important process. It has become increasingly accepted that long-lasting polymers are not sufficient for applications intended for short-term use. This process will accelerate further when concerns about the protection of ecological systems are also taken into account. When bioplastics are obtained, a biologically derived material is used as raw material. This material can be of plant origin such as starch or corn, or it can be a microorganism such as bacteria or yeast that performs biotransformation using this plant. Mass energy cycles are closed. When they decompose in nature, they are separated into their basic components and mixed back into the carbon cycle. When their lifespan is over, if they are used to obtain heat, they produce energy, which has a neutral effect on the climate. Especially considering the increase in recent years, it is a very important feature that it protects fossil-based raw material reserves and reduces dependence on oil. By composting bioplastics, carbon-rich compost is obtained that can be used in farms, agricultural lands, etc. This process is also important in terms of reducing chemical fertilizer consumption [7].
As for the disadvantages of bioplastics, they are still produced in relatively small quantities, which is one of the reasons why they are expensive. This will change when bioplastic production begins on a large scale and production costs will decrease. Biopolymers, which are less durable than traditional plastics, may not provide sufficient performance in some applications. Especially for the production of single-use products, the choice of biopolymers may lead to durability problems. The manufacturing process can sometimes be complex and energy intensive, which can limit the potential of biopolymers to reduce their environmental impact [8,9].

2. Component materials involved in the production of biodegradable composite matrix

High molecular weight compounds with a long chain or branched structure, formed by many identical or different atomic groups connected by chemical bonds in a small or regular manner [10,11]. These long chains are held together by cross-links, Van der Waals bonds, hydrogen bonds or primary covalent bond forces. The properties of polymers vary greatly depending on their monomers, which are their building blocks. Therefore, the selection of appropriate biomaterials for the application area should be made carefully. Starch, chitosan, cellulose, natural rubber, albumin, lginate, protein, shellac, lignin and polyhydroxyalkanotes, gelatin and DNA (genetic material) belong to the group of natural polymers. There are also many synthetics available today. The types of nanoscale materials, their importance and loading levels into the matrix, as well as the impact of nanoscale materials on coating application are discussed. Additionally, this review explores various applications and properties of film-forming materials [12,13].

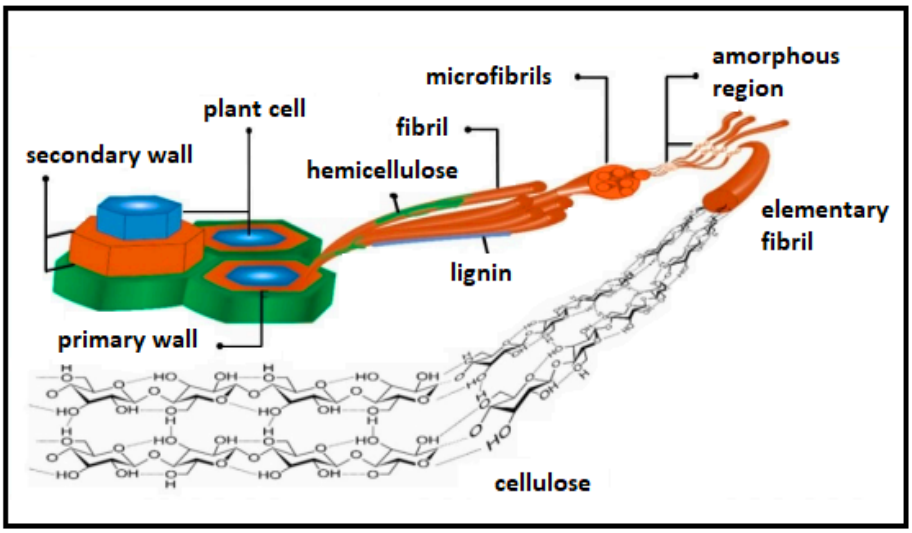


Figure 1. Schematic representation of the hierarchical structure of cellulose obtained as a result of the extraction process from plants [14]

Lignin, hemicellulose, waxes, extracts and trace elements are among the materials that form the composite in plant materials. Cellulose exists as a cellular hierarchical biocomposite within some structures such as these materials. [14]

2.1. Natural Polymers and in situ Polymerization

Polymers are long-chain molecules composed of small repeatable units. The low molecular weight units used to start the synthesis are called "monomers". Natural polymers used in polymeric biomaterials used in the biomedical field can be classified as hydrogels, inorganic polymers, biodegradable polymers, smart polymers, fabrics, grafts and coatings. Natural polymers are grouped into three classes: proteins, polysaccharides and polynucleotides. In this review, functional groups, chemical structures and technological applications of natural polymers such as cellulose, chitosan, lignin, pullulan, polyhydroxyalkanoate and protein were investigated.

The advantages of natural polymers are that they are very similar to macromolecules in the biological environment. It does not have the toxicity and chronic inflammation problems encountered with synthetic polymers. They are degraded by enzymes in the biological environment (biodegradation). Disadvantages of natural polymers: They have an effect that disrupts the body's immune system (immunogenic). Disadvantages of natural polymers: These polymers, no matter how natural they are, have an immunogenic effect that disrupts the body's immune system. The living body is protected by many defense systems consisting of very different molecules, cells and tissues. All molecules that stimulate the immune systems of living beings and are not their own are called "antigens" or "immunogens". With their protective elements, the living being first prevents "antigens" that are foreign to its structure from entering the body. This protection is a system that is increased layer by layer, its members are; surface barriers, innate and acquired immune system [15]. If any antigen can overcome the surface barriers such as the skin, respiratory and digestive system, which are the first barrier, and enter the living being, the second defense system is immediately activated. Because the immune system is the sum of the processes that protect against diseases in a living being, recognize

pathogens and tumor cells and destroy them. The immune system can distinguish substances with very similar properties from each other, for example; it has the ability to distinguish even proteins with one amino acid different from each other. This distinction is complex enough to cause pathogens to find new ways to infect despite the host's defense system and to make some adaptations. In order to survive in this struggle, some mechanisms have developed that recognize pathogens and neutralize them [15,16]. Since they have a more complex structure than synthetic polymers, their technological manipulation is difficult. They are degraded by enzymes in the biological environment. In particular, protein structures decompose at high temperatures. Thermoforming and sterilization are difficult are difficult. Their composition varies depending on the source from which they are obtained [17]**.**

As seen in Figure 2, monomers polymerize in the presence of nanoclay. These biomaterials first swell in liquid monomer solution and the polymerization process takes place between the intermediate layers formed [18]. However, it is a disadvantage that some inorganic particles in the structure tend to separate rapidly from the polymer formed and precipitate. To eliminate this disadvantage, certain groups must be attached to their surfaces [19,20].

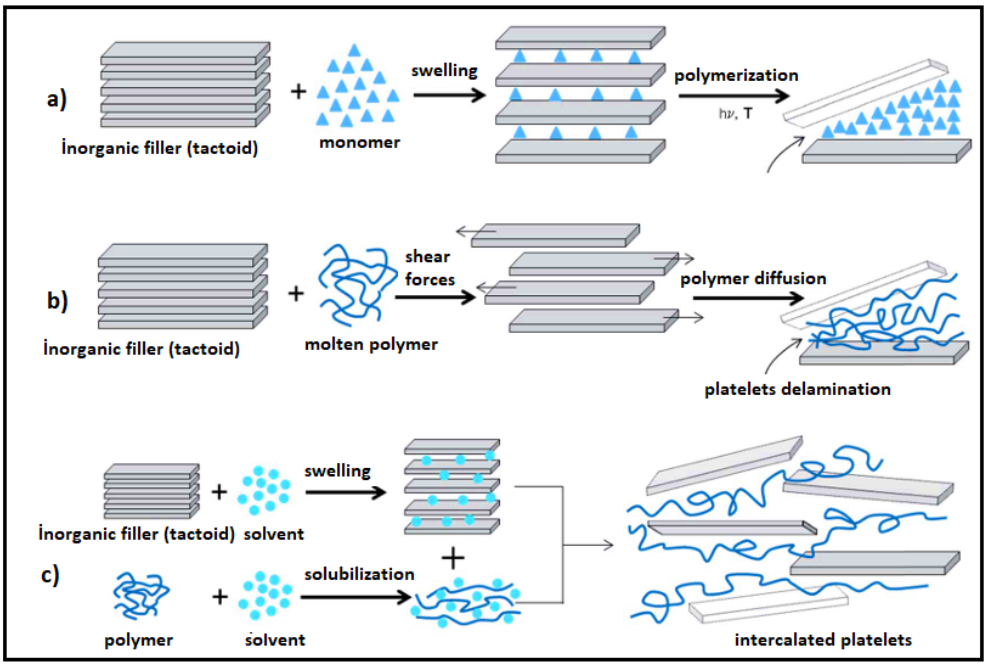


Figure 2. Schematic representation of the polymerization process of monomers in the presence of nanoclay via (a) in situ polymerization, (b) melt processing, and (c) solution casting [18]

Some instability may occur during processing, such as PLA-, chitosan- and pullulan-based bionanocomposites. To eliminate this situation, the process can be accelerated with nanocomposites containing organically modified clay. While these processes have been conducted, some parameters must be carefully optimized during the process of some biopolymers that may degrade in heat [19].

2.1.1 Cellulose-based bionanocomposites

Natural polymers are divided into classes based on functional groups, bonding nature, thermal behavior, and solubility in different solvents has a linear chain of several hundred

to over ten thousand (1→4) linked d-glucose units. Different derivatives made with cellulose are used as optical films, coatings, controlled release systems, biodegradable plastics, and composite materials in different applications in the field of biomedical materials. Such derivatives include cellulose ethers such as methyl cellulose (MC), carboxymethyl cellulose (CMC), hydroxypropyl cellulose (HPC), hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) and cellulose acetate (CA), cellulose acetate propionate (CAP), cellulose acetate butyrate (CAB). In this study by Swain, cellulose nanobiocomposites were formed by intercalating boron nitride with cellulose matrix by solution method. Boron nitride dispersion and nanobiocomposite formation showed significant reduction in oxygen permeability [21]. By adding cellulose into polymer films, moisture barrier properties are further improved. The presence of crystalline fibers within the composite creates a lower diffusion process and therefore lower permeability. It has been stated that nanosized cellulose fibrils also improve the thermal properties of polymers. It has been stated that the thermal stability of polymers in nanocomposites with cellulose hair-crystals is improved compared to similar polymer clusters.

Cellulose is used in many applications when creating composite films due to its superior properties such as water absorption capacity, strong reinforcement and excellent dimensional stability, as well as its strength and durability [22]. Since coatings made using cellulose are less damaged by environmental effects, stable and high-performance nanocomposite films have attracted widespread attention [23,24]. Wu et al., observed that when they developed polyurethane with cellulose nanofibrils, its elongation decreased due to conventional micro-sized cellulose filling [25]. These differences may be related to different degrees of matrix-cellulose interactions. According to the study by Wang et al., the addition of weakly interacting nano-reinforcements containing matrix causes elongation. Due to this elongation, the strength of the material decreases [26].
As shown in Figure 3, cellulose nanocrystals or nanoparticles (CNCs) are crystal structures that have an amorphous structure within the crystal regions and are well organized and coordinated within the cellulose fibers themselves.

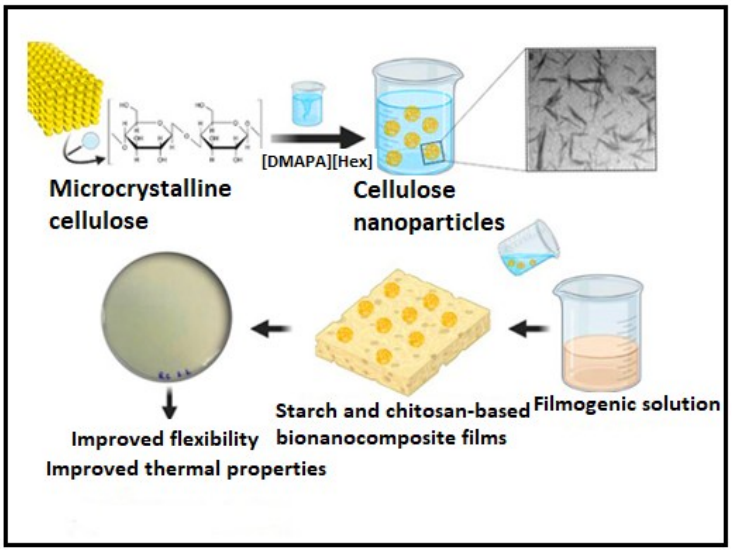


Figure 3. Schematic representation of the bionanocomposite formed by cellulose nanoparticles in an amorphous structure [27]

These structures, the molecular arrangement of cellulose and their bond structures with each other, were clearly revealed by Habibi et al. CNCs have recently been investigated

as microcrystals, nanofibers or nanofibrils obtained using different mechanical and chemical processes [27]. The advantages of these fibers such as high thermal stability, high aspect ratio, relatively high strength, low density, excellent tensile strength and mechanical strength are determined by the formation of polymer-based nanocomposites. In addition to these features, surface modification processes also improve the properties of CNCs. In the study conducted by Habibi et al., surface coating processes and mechanical properties with CNCs were examined [28,29]. Cellulose derivative-based films for creating bionanocomposites show good tensile strength, acting as an effective barrier protecting the material against O_2 or CO_2 [30,31].

2.1.2 Starch-based bionanocomposites

Starch consists of granules in which polymer chains are tightly interlocked. The chains in the granules, which water cannot normally penetrate, move away from each other at high temperatures and become capable of interacting with water. Under the influence of water and temperature, the polymers in starch bind to water instead of forming hydrogen bonds with each other. As water penetrates into the starch, the order of the overall polymer structure begins to deteriorate and the granular regions become smaller and amorphous. Amylose interacting with water leaches out of the starch grain [32]. In recent years, there has been a significant increase in studies on water absorbent polymers. Starch-graft copolymers have a significant percentage in these studies. However, many of its applications are limited due to its poor mechanical properties, such as lack of barrier properties and film gloss caused by high intermolecular forces [33,34]. After extrusion, starch typically turns into a thermoplastic material with low mechanical strength and poor protection against oxygen and moisture.

Quintavalla et al., prepared hybrids of nanoclay and thermoplastic starch (TPS)[35] and when they examined their final properties, they found that the strong interaction between TPS and nanoclay improved the tensile strength and had lower water vapor permeability compared to the pure TPS matrix [36]. When the amorphous regions that enable the separation of crystalline lamellae, which are more resistant to hydrolysis, are hydrolyzed, native starch granules are formed. It can be subjected to long-term hydrolysis at temperatures below the gelatinization temperature [37].
Turmeric nanofilm (TNF) film was prepared to create bionanocomposite and change its functional properties to compare with each other. A schematic representation of the preparation steps of these films is presented in Figure 4.

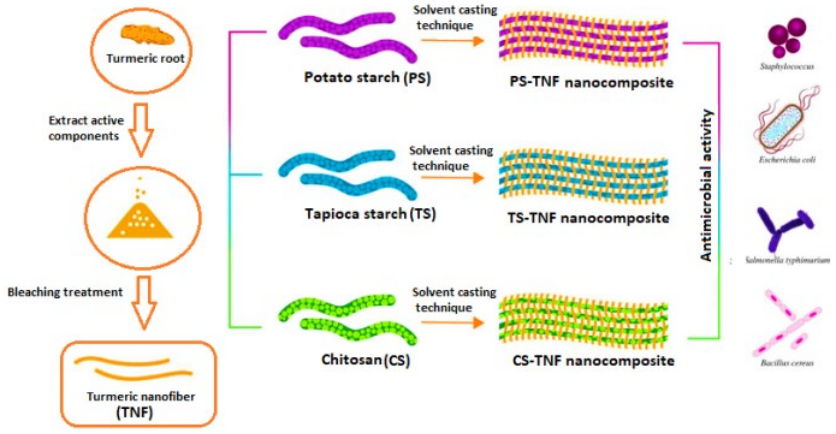


Figure 4. Schematic representation of the preparation of bionanocomposites obtained with starch-based materials and their antibacterial activities [38]

Antibacterial activities of biopolymer matrices and antibacterial performance of the prepared bionanocomposite were investigated by adding TNF to B. cereus, E. coli, S. aureus and S. typhimurium [38].
In a study by Sorrentino et al., it was observed that both the tensile strength and elongation at break of TPS increased in the presence of small amounts of sodium montmorillonite (less than 5%). Additionally, while the relative water vapor diffusion coefficient of TPS decreased, the decomposition temperature increased. Starch/clay nanocomposite films were obtained from the dispersion of montmorillonite nanoparticles using the polymer melting process technique. Mechanical characterization results showed an increase in modulus and tensile strength. The compliance of the final material sample with the actual regulations on biodegradable materials was confirmed by migration tests [39].

Pea starch/α-ZrP(PS/ZrP) nanocomposite films prepared by casting and solvent evaporation method are formed through hydrogen bonds. The structure, thermal and mechanical properties of pea starch-based films were modified and improved by incorporating αZrP [25].

3. Chitin/Chitosan based bionanocomposites

Chitosan is a partially N-deacetylated derivative of chitin. It is theoretically possible to completely remove the acetyl groups, the branched group of chitin, but n-deacetylation almost never occurs completely. Methods for obtaining chitosan are divided into chemical and enzymatic. Osuna et. al., prepared a magnetically recoverable biopolymer-based nanocatalyst via covalent immobilization of chitosan-linked 2-hydroxynaphthaldehyde Pd complex on the surface of superparamagnetic nanoparticles [40]. Liu et al., and Sriupayo et al., prepared chitin hair-crystals by acid hydrolysis of chitin [41,42].

The average sizes of bristle-crystals were calculated according to Liu et al., as 500 nm in length and 50 nm in diameter, and by Sriupayo et al., [42] as 417 nm in length and 33 nm in diameter. Liu et al., [41] incorporated chitin hair-crystals into soy protein isolate thermoplastics and the hair-crystals significantly improved not only the tensile properties (tensile strength and elastic modulus) of the matrix but also its resistance to water. Due to the hydrophilic character of chitosan, its weak mechanical properties in the presence of water and humid environments limit its use. Therefore, by adding chitosan chains to the inner layers of the silicate, chitosan layered silicate nanocomposites were created, that is, by adding $MMTNa^+$ to the chitosan matrix by increasing it to 5 wt%, its mechanical properties were improved. Surface roughness increased with the addition of a small amount of nanoclay, which improved the mechanical and thermal properties of the resulting films compared to Cloisite 30B [43].

Chitosan/tripolyphosphate nanoparticles tend to fill the empty spaces within the pores of the HPMC matrix and, when added to hydroxypropyl methylcellulose films, significantly improved the thermal, mechanical and barrier properties [44].

4. Oil-based bionanocomposites

Hydrophobic oil-based materials such as neutral lipids, fatty acids or waxes are added to biopolymer films to improve moisture barrier properties. High strength and hard

composites and nanocomposites based on epoxidized soybean oil (ESO) were formed through flax fiber and organic clay reinforcement, and ESO/clay nanocomposites were observed to develop in an intercalated structure [45].

Triglyceride oil-based polymer-silver nanocomposites were obtained through electron transfer reaction and free radical polymerization processes. Due to the antibacterial effect of silver, these nanocomposite films showed good antibacterial effects against gram-positive (S. aureus), gram-negative (P. aeroginosa) and spore-form (B. subtilis) bacteria, and an inhibition zone was created. Nanocomposite samples showed better film properties than polymers other than silver nanoparticles [46].

5. Protein-based bionanocomposites

Edible films made from proteins are the most interesting films. The first reason for this is; secondly, increasing the nutritional value. It has impressive gas barrier properties compared to lipid and polysaccharide films. Therefore, the properties of edible films, especially protein films, are greatly improved by the addition of nanoclay [47].

Nanocomposite films between wheat gluten and montmorylnonite (WG/MMT) were obtained by casting method. It was confirmed by transmission electron microscopy that MMT particles were homogeneously distributed in the composite film. While the O_2 and CO_2 permeability of the films remained unchanged when the MMT content was higher than 5%, significant changes were observed in their permeability to water vapor and aroma components [48].

Nanofibers obtained from soybeans were added to polymers such as polyethylene, polyvinyl alcohol and polypropylene, and these nanofibers have diameters between 50 nm and 100 nm and micro-sized lengths. The increased stiffness of soybean nanofibers reinforced with 5% (wt) PVA is very promising. The addition of nanofibers significantly changed the tensile behavior of the composites, and the tension of the nanofibers coated with ethylene-acrylic oligomer emulsion as a dispersant increased, but the amount of nanofiber elongation decreased [49].

Plasticized protein coating was prepared on polypropylene (PP) film, and its optical and tensile properties were examined to determine the effect of protein and plasticizer type in utilizing a new composite film for food packaging applications. The film coated with the composite obtained with different plasticizers such as propylene glycol, glycerol, polyethylene glycol, sorbitol, sucrose and different proteins such as soy protein isolate, milk protein isolate and corn casein has more transparency and tensile strength and more excellent visual quality than other coated films. and has been found to have mechanical properties. Thanks to these properties, it has great potential for applications in active packaging systems [50].

6. Nanocellulose-reinforced natural rubber composite

The results of using natural rubber as a reinforcement material in bionanocomposites are shown in Figure 5. It has been shown that due to its very good flexibility, it can be used

in the dispersed aqueous phase as a nanofiller reinforcement to examine the healing effects and is an excellent candidate for this system [51].

As shown in Figure 5, hydrodynamic effects occur between the filler and natural rubber.

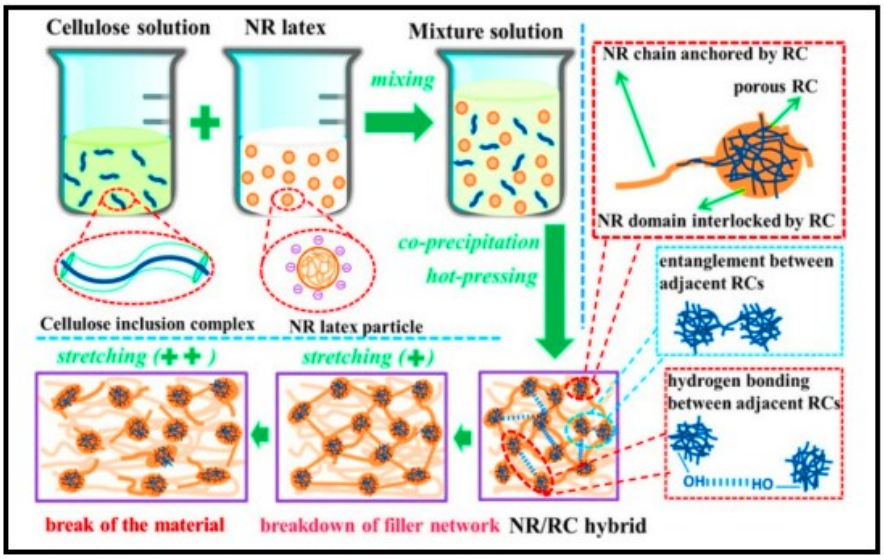


Figure 5. Schematic representation of bionanocomposite formed by cellulose of natural rubber reinforced with regenerated cellulose in alkaline urea-aqueous system [51]

Additionally, strong interactions and percolation effects contribute to stress distribution, leading to remarkable improvements in tensile strength by up to 8.5 times and spherical modulus by up to 29 times [51].

7. Conclusions

In recent years, the field of bio-based nanocomposite coating films has been developing rapidly and these materials are synthesized by various methods. This review aims to provide information about different synthesis approaches, bionanomaterials with various shapes and sizes, and the production of composite films created with them. These films are used in many different applications due to their recyclable properties such as both external factors and biodegradability. Especially in recent studies, improvement techniques to increase the quality of the materials forming this bionanocomposite coating film are being investigated.

Different bionanocomposite coating film formation approaches have improved the physicochemical, thermal and mechanical properties of the structures as well as their application areas. However, in order for biopolymers to compete with stronger and more formable commercial polymers such as polyethylene or polypropylene, different techniques must be developed to improve their functional properties. Market research supports the idea that biopolymers will play a significant role in many industrial sectors in the coming years.

References

[1] Bharadwaj, A. An Overview on Biomaterials and Its Applications in Medical Science. I**OP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng**. 2021, 1116, 012178, doi:10.1088/1757-899X/1116/1/012178.

[2] Bahrpaima, K.; Fatehi, P. Preparation and Coagulation Performance of Carboxypropylated and Carboxypentylated Lignosulfonates for Dye Removal. **Biomolecules** 2019, 9, doi:10.3390/biom9080383.

[3] Alashrah, S.; El-Ghoul, Y.; Omer, M.A.A. Synthesis and Characterization of a New Nanocomposite Film Based on Polyvinyl Alcohol Polymer and Nitro Blue Tetrazolium Dye as a Low Radiation Dosimeter in Medical Diagnostics Application. **Polymers** (Basel). 2021, 13, doi:10.3390/polym13111815.

[4] Miroshnichenko, S.; Timofeeva, V.; Permykova, E.; Ershov, S.; Kiryukhantsev-Korneev, P.; Dvořaková, E.; Shtansky, D. V.; Zajíčková, L.; Solovieva, A.; Manakhov, A. Plasma-Coated Polycaprolactone Nanofibers with Covalently Bonded Platelet-Rich Plasma Enhance Adhesion and Growth of Human Fibroblasts. **Nanomaterials** 2019, 9, doi:10.3390/nano9040637.

[5] Ammar, C.; Alminderej, F.M.; El-Ghoul, Y.; Jabli, M.; Shafiquzzaman, M. Preparation and Characterization of a New Polymeric Multi-Layered Material Based K-Carrageenan and Alginate for Efficient Bio-Sorption of Methylene Blue Dye. **Polymers** (Basel). 2021, 13, doi:10.3390/polym13030411.

[6] Mekuye, B.; Abera, B. Nanomaterials: An Overview of Synthesis, Classification, Characterization, and Applications. Nano Sel. 2023, 4, 486–501, doi:10.1002/nano.202300038.

[7] Jaya, B.; Brajesh, B.; Antonella, F.; Giovanna, L.D.; Amit, K. Biopolymer : A Sustainable Material for Food and Medical Applications. **Polymers** (Basel). 2022, 14, 983.

[8] Musa, Y.; Bwatanglang, I.B. Current Role and Future Developments of Biopolymers in Green and Sustainable Chemistry and Catalysis; INC, 2020; ISBN 9780128167892.

[9] Abe, M.M.; Martins, J.R.; Sanvezzo, P.B.; Macedo, J.V.; Branciforti, M.C.; Halley, P.; Botaro, V.R.; Brienzo, M. Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. **Polymers** (Basel). 2021, 13, doi:10.3390/polym13152484.

[10] Simões, S. Modular Hydrogels for Drug Delivery. J. Biomater. **Nanobiotechnol**. 2012, 03, 185–199, doi:10.4236/jbnb.2012.32025.

[11] Liu, Y.; Tas, S.; Zhang, K.; De Vos, W.M.; Ma, J.; Vancso, G.J. Thermoresponsive Membranes from Electrospun Mats with Switchable Wettability for Efficient Oil/Water Separations. **Macromolecules** 2018, 51, 8435–8442, doi:10.1021/acs.macromol.8b01853.

[12] Bronzino, J.D. Medical Devices and Systems; Bronzino, J.D., Ed.; CRC Press, 2006; ISBN 9780429123047.

[13] Bajpai, A.K.; Shukla, S.K.; Bhanu, S.; Kankane, S. Responsive Polymers in Controlled Drug Delivery. **Prog. Polym. Sci.** 2008, 33, 1088–1118, doi:10.1016/j.progpolymsci.2008.07.005.

[14] Applications, T. Review of Bionanocomposite Coating Films And. 1–33, doi:10.3390/polym8070246.

[15] Black AE, Coward WA, Cole TJ, P.A. Nutrient Reference Values for Australia and New Zealand Including Recommended Dietary Intakes; 2005; ISBN 1864962372.

[16] Litman, G.W.; Cannon, J.P.; Dishaw, L.J. Reconstructing Immune Phylogeny: New Perspectives. **Nat. Rev. Immunol.** 2005, 5, 866–879, doi:10.1038/nri1712.

[17] Silva, A.C.Q.; Silvestre, A.J.D.; Vilela, C.; Freire, C.S.R. Natural Polymers-Based Materials: A Contribution to a Greener Future. **Molecules** 2022, 27, doi:10.3390/molecules27010094.

[18] Sinha Ray, S.; Okamoto, M. Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: A Review from Preparation to Processing. Prog. **Polym. Sci.** 2003, 28, 1539–1641, doi:10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002.

[19] Unalan, I.U.; Cerri, G.; Marcuzzo, E.; Cozzolino, C.A.; Farris, S. Nanocomposite Films and Coatings Using Inorganic Nanobuilding Blocks (NBB): Current Applications and Future Opportunities in the Food Packaging Sector. RSC Adv. 2014, 4, 29393–29428, doi:10.1039/c4ra01778a.

[20] Peelman, N.; Ragaert, P.; Ragaert, K.; De Meulenaer, B.; Devlieghere, F.; Cardon, L. Heat Resistance of New Biobased Polymeric Materials, Focusing on Starch, Cellulose, PLA, and PHA. **J. Appl. Polym. Sci.** 2015, 132, doi:10.1002/app.42305.

[21] Swain, S.K.; Dash, S.; Behera, C.; Kisku, S.K.; Behera, L. Cellulose Nanobiocomposites with Reinforcement of Boron Nitride: Study of Thermal, Oxygen Barrier and Chemical Resistant Properties. **Carbohydr. Polym**. 2013, 95, 728–732, doi:10.1016/j.carbpol.2013.02.080.

[22] Czaja, W.; Romanovicz, D.; Brown, R.M. Structural Investigations of Microbial Cellulose Produced in Stationary and Agitated Culture. 2004, 403–411.

[23] Shi, Z.; Zhang, Y.; Phillips, G.O.; Yang, G. Food Hydrocolloids Utilization of Bacterial Cellulose in Food. **Food Hydrocoll.** 2014, 35, 539–545, doi:10.1016/j.foodhyd.2013.07.012.

[24] Fortunati, E.; Puglia, D.; Luzi, F.; Santulli, C.; Kenny, J.M.; Torre, L. Binary PVA Bio-Nanocomposites Containing Cellulose Nanocrystals Extracted from Different Natural Sources : Part I. **Carbohydr. Polym.** 2013, 97, 825–836, doi:10.1016/j.carbpol.2013.03.075.

[25] Wu, H.; Liu, C.; Chen, J.; Chang, P.R.; Chen, Y.; Anderson, D.P. Structure and Properties of Starch/α-Zirconium Phosphate Nanocomposite Films. **Carbohydr. Polym**. 2009, 77, 358–364, doi:10.1016/j.carbpol.2009.01.002.

[26] Wang, S.F.; Shen, L.; Tong, Y.J.; Chen, L.; Phang, I.Y.; Lim, P.Q.; Liu, T.X. Biopolymer Chitosan/Montmorillonite Nanocomposites: Preparation and Characterization. **Polym. Degrad. Stab.** 2005, 90, 123–131, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2005.03.001.

[27] Habibi, Y.; Lucia, L.A.; Rojas, O.J. Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications. **Chem. Rev.** 2010, 110, 3479–3500, doi:10.1021/cr900339w.

[28] Tan, B.K.; Ching, Y.C.; Gan, S.N.; Rozali, S. Biodegradable Mulches Based on Poly(Vinyl Alcohol), Kenaf Fiber, and Urea. **BioResources** 2015, 10, 5515–5531, doi:10.15376/biores.10.3.5515-5531.

[29] Ali, M.E.; Yong, C.K.; Ching, Y.C.; Chuah, C.H.; Liou, N.S. Effect of Single and Double Stage Chemically Treated Kenaf Fibers on Mechanical Properties of Polyvinyl Alcohol Film. **BioResources** 2015, 10, 822–838, doi:10.15376/biores.10.1.822-838.

[30] Chee, Y.; Ershad, C.; Luqman, A.; Abdullah, C.; Hock, C.; Liou, C.N. Rheological Properties of Cellulose Nanocrystal-Embedded Polymer Composites : A Review. **Cellulose** 2016, 23, 1011–1030, doi:10.1007/s10570-016-0868-3.

[31] Yin, K.; Yern, G.; Ching, C.; Hock, C. Erratum to : Individualization of

Microfibrillated Celluloses from Oil Palm Empty Fruit Bunch : Comparative Studies between Acid Hydrolysis and Ammonium Persulfate Oxidation. **Cellulose** 2016, 23, 2245–2246, doi:10.1007/s10570-016-0921-2.

[32] Thakur, V.K.; Thakur, M.K. Recent Trends in Hydrogels Based on Psyllium Polysaccharide: A Review. **J. Clean. Prod.** 2014, 82, 1–15, doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.066.

[33] Erry, P.K.W.N.G. Preparation and Characterization of Chitosan-Based Nanocomposite Films with Antimicrobial Activity. 2006, 21–23.

[34] Badawy, M.E.I.; Rabea, E.I. A Biopolymer Chitosan and Its Derivatives as Promising Antimicrobial Agents against Plant Pathogens and Their Applications in Crop Protection. 2011, 2011, doi:10.1155/2011/460381.

[35] Quintavalla, S.; Vicini, L. Antimicrobial Food Packaging in Meat Industry. 2002, 62, 373–380.

[36] Sozer, N.; Kokini, J.L. Nanotechnology and Its Applications in the Food Sector. 2009, doi:10.1016/j.tibtech.2008.10.010.

[37] Kristo, E.; Biliaderis, C.G. Physical Properties of Starch Nanocrystal-Reinforced Pullulan Films. 2007, 68, 146–158, doi:10.1016/j.carbpol.2006.07.021.

[38] Gopi, S.; Amalraj, A.; Jude, S.; Thomas, S.; Guo, Q. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Bionanocomposite Films Based on Potato , Tapioca Starch and Chitosan Reinforced with Cellulose Nanofiber Isolated from Turmeric Spent. **J. Taiwan Inst. Chem. Eng.** 2019, 96, 664–671, doi:10.1016/j.jtice.2019.01.003.

[39] Sorrentino, A.; Vittoria, V. Potential Perspectives of for Food Packaging Applications. 2007, 18, 84–95, doi:10.1016/j.tifs.2006.09.004.

[40] Osuna, Y.; Gregorio-Jauregui, K.M.; Gaona-Lozano, J.G.; De La Garza-Rodríguez, I.M.; Ilyna, A.; Barriga-Castro, E.D.; Saade, H.; López, R.G. Chitosan-Coated Magnetic Nanoparticles with Low Chitosan Content Prepared in One-Step. J. **Nanomater**. 2012, 2012, doi:10.1155/2012/327562.

[41] Liu, Z.; Erhan, S.Z.; Xu, J. Preparation , Characterization and Mechanical Properties of Epoxidized Soybean Oil / Clay Nanocomposites *. 2005, 46, 10119–10127, doi:10.1016/j.polymer.2005.08.065.

[42] Sriupayo, J.; Supaphol, P.; Blackwell, J.; Rujiravanit, R. Preparation and Characterization of a -Chitin Whisker-Reinforced Chitosan Nanocomposite Films with or without Heat Treatment. 2005, 62, 130–136, doi:10.1016/j.carbpol.2005.07.013.

[43] Xu, Y.; Ren, X.; Hanna, M.A. Chitosan / Clay Nanocomposite Film Preparation and Characterization. 2022, doi:10.1002/app.22664.

[44] Moura, M.R. De; Aouada, F.A.; Avena-bustillos, R.J.; Mchugh, T.H. Improved Barrier and Mechanical Properties of Novel Hydroxypropyl Methylcellulose Edible Films with Chitosan / Tripolyphosphate Nanoparticles Improved Barrier and Mechanical Properties of Novel Hydroxypropyl Methylcellulose Edible Films with Chitosan / **Tr. J. Food Eng.** 2009, 92, 448–453, doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.12.015.

[45] Liu, W.; Fei, M.; Ban, Y.; Jia, A.; Qiu, R. Preparation and Evaluation of Green Composites from Microcrystalline Cellulose and a Soybean-Oil Derivative. 2017, doi:10.3390/polym9100541.

[46] Eksik, O.; Yagci, Y. In Situ Synthesis of Oil Based Polymer Composites Containing. 2008, doi:10.1080/10601320802218887.

[47] Akbari, Z.; Faculty, C.E. Improvement in Food Packaging Industry with Biobased Nanocomposites Improvement in Food Packaging Industry with Biobased Nanocomposites. 2007, 3, doi:10.2202/1556-3758.1120.

[48] Tunc, S.; Angellier, H.; Cahyana, Y.; Chalier, P.; Gontard, N.; Gastaldi, E. Functional Properties of Wheat Gluten / Montmorillonite Nanocomposite Films Processed by Casting. 2007, 289, 159–168, doi:10.1016/j.memsci.2006.11.050.
[49] Wang, B.; Sain, M. SCIENCE AND Isolation of Nanofibers from Soybean Source and Their Reinforcing Capability on Synthetic Polymers. 2007, 67, 2521–2527, doi:10.1016/j.compscitech.2006.12.015.
[50] Lee, J.; Son, S.; Hong, S. Characterization of Protein-Coated Polypropylene Films as a Novel Composite Structure for Active Food Packaging Application. 2008, 86, 484–493, doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.10.025.
[51] Yi, D.; Low, S.; Supramaniam, J.; Soottitantawat, A.; Charinpanitkul, T.; Tanthapanichakoon, W.; Tan, K.W.; Tang, S.Y. Recent Developments in Nanocellulose-Reinforced Rubber Matrix Composites : A Review. 2021, 1–35.

DOI:10.25092/baunfbed. 1584868 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 425-442, (2025)*

Elektrokoagülasyon yöntemiyle atık sularının arıtımı: etkinlik, modelleme ve kontrol yaklaşımları

Dursun Alp KIZILÖZ[1], Metin DEMİRTAŞ[2*]

[1]Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Bursa/Türkiye
[2]Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir/Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 13.11.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.02.2025

Öz

Elektrokoagülasyon, atık suya daldırılmış anot ve katot metallerine elektrik akımı uygulanarak kirleticilerin elektrokimyasal reaksiyonlarla giderilmesini sağlayan bir arıtma yöntemidir. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük enerji tüketimi, daha az kimyasal kullanımı ve kısa işlem süresi gibi avantajlarıyla öne çıkar. Ancak, bu prosesin etkinliği; akım yoğunluğu, elektrot tipi, elektrot bağlantı konfigürasyonu, pH ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu çalışmada, tekstil ve kağıt endüstrisi başta olmak üzere farklı atık sularda gerçekleştirilen elektrokoagülasyon çalışmaları gözden geçirilmiş, parametrelerin arıtma süreci üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Araştırmalar hem kağıt hem de tekstil endüstrisinde elektrokoagülasyon prosesi sonucunda %90'ın üzerinde Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) giderim veriminin elde edilebileceğini göstermektedir. Farklı atık sular üzerinde yapılan modelleme ve kontrol çalışmaları sonucunda, optimizasyon ve kontrol uygulamalarıyla, arıtma veriminde artış ve enerji maliyetinde azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu makalede, elektrokoagülasyon prosesinin temel çalışma prensipleri, proses üzerinde etkili olan faktörler ve süreci iyileştirmeye yönelik modelleme ile kontrol çalışmaları kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Atık su arıtımı, elektrokoagülasyon, kontrol ve modelleme.*

Dursun Alp KIZILÖZ, alp.kiziloz@btu.edu.tr, https://orcid.org/0009-0008-7501-7102
[*]Metin DEMİRTAŞ, mdtas@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0003-2622-5286

Treatment of wastewater by electrocoagulation: efficiency, modeling and control approaches

Abstract

Electrocoagulation is a treatment method that removes pollutants by electrochemical reactions by applying electric current to anode and cathode metals immersed in wastewater. It stands out with its advantages such as lower energy consumption, less chemical use and short process time compared to traditional methods. However, the effectiveness of this process depends on many factors such as current density, electrode type, electrode connection configuration, pH and temperature. In this study, electrocoagulation studies carried out in different wastewaters, especially in the textile and paper industry, were reviewed and the effects of the parameters on the treatment process were examined in detail. Studies show that over 90% Chemical Oxygen Demand (COD) removal efficiency can be achieved as a result of the electrocoagulation process in both the paper and textile industries. As a result of modeling and control studies conducted on different wastewaters, with optimization and control applications, it was determined that an increase in treatment efficiency and a decrease in energy costs were achieved. In this article, the basic working principles of the electrocoagulation process, the factors affecting the process and modeling and control studies aimed at improving the process are analyzed comprehensively.

Keywords: *Wastewater treatment, electrocoagulation, control and modeling.*

1. Giriş

Su, yaşamın sürdürülebilmesi için temel bir gerekliliktir ve su kaynaklarının temizliği, günümüzün en kritik çevresel sorunlarından biri haline gelmiştir. Giderek artan nüfus, sanayileşme ve tarımsal faaliyetler, su kaynaklarının kirliliğini büyük ölçüde artırmış ve etkin su arıtma teknolojilerine olan ihtiyacı zorunlu kılmıştır. Su arıtımı, sadece çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda insan sağlığının korunması için de büyük önem taşımaktadır. Geleneksel su arıtma yöntemleri bazı durumlarda etkili olsa da endüstriyel atık suların arıtımı gibi karmaşık sorunların çözümünde yetersiz kalabilmektedir. Bu noktada elektrokoagülasyon prosesi, özellikle ağır metal, boya, organik kirleticiler ve yağ gibi maddelerin uzaklaştırılmasında etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Elektrokoagülasyon, su arıtma teknolojisi olarak ilk kez 1900'lü yılların başında kullanılmaya başlanmıştır [1]. Ancak, bu teknolojinin ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılması, daha çok 1970'li yıllardan sonra olmuştur. Zamanla, teknolojideki gelişmelerle birlikte elektrokoagülasyon, geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılan ve özellikle ağır metal iyonlarının gideriminde etkili bir çözüm olarak kabul görmüştür [2].

Elektrokoagülasyon prosesi atık su içine daldırılmış anot ve katot metallerine elektrik akımı uygulanarak elektrokimyasal tepkimelerin tetiklenmesi prensibine dayanmaktadır. Elektrokimyasal tepkimeler sonucunda atık su içerisinde metal hidroksit flokları oluşmakta, bu da sudaki Askıda Katı Madde (AKM), KOİ, Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve renk gibi kirlilik parametrelerinin giderilmesini sağlamaktadır. AKM, atık suda çözünmüş ve askıda bulunan mineral ve organik parçacıkların toplamını ifade eder. Bu maddeler, suyun fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde ciddi olumsuz etkiler

yaratabilir. Atık sudaki koloidal elementlerin konsantrasyonunu belirlemek, kirliliğin su ekosistemi üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemlidir [3]. KOİ, organik maddelerin kimyasal oksidasyon sürecinde tüketilen oksijen miktarını ölçen bir parametredir. BOİ ise, biyokimyasal süreçler yoluyla parçalanabilen organik maddelerin ayrışması sırasında kullanılan oksijen miktarını ifade eder [4]. Elektrokoagülasyon prosesinin verimliliği uygulanan akım yoğunluğu, pH, sıcaklık, elektrot materyali ve elektrot bağlantı konfigürasyonu, iletkenlik, elektrotlar arası mesafe ve süre gibi birçok parametreye bağlıdır [5-10]. Bu sebeple, prosesin modellenmesi ve kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Elektrokoagülasyon, düşük enerji maliyeti, çevre dostu olması ve minimum kimyasal gereksinimi ile dikkat çeken bir su arıtma teknolojisidir. Diğer arıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında, daha az çamur üretmesi ve daha kısa işlem süresi gibi avantajları bulunmaktadır [5]. Özellikle endüstriyel atık sularının işlenmesi sırasında hem ekonomik hem de operasyonel avantajlar sunarak, çevresel etkileri minimuma indirmektedir. Bu çalışmada elektrokoagülasyon prosesinin çalışma prensibi ve prosesi etkileyen faktörler literatürde yapılan çalışmalardan derlenerek açıklanmıştır. Birçok farklı parametreye bağlı olan elektrokoagülasyon prosesinin modellenmesi ve kontrolü konusunda literatürde yapılmış çalışmalara değinilmiştir. Prosesin verimini artırmak ve enerji maliyetini azaltmak amacıyla gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutulmuştur.

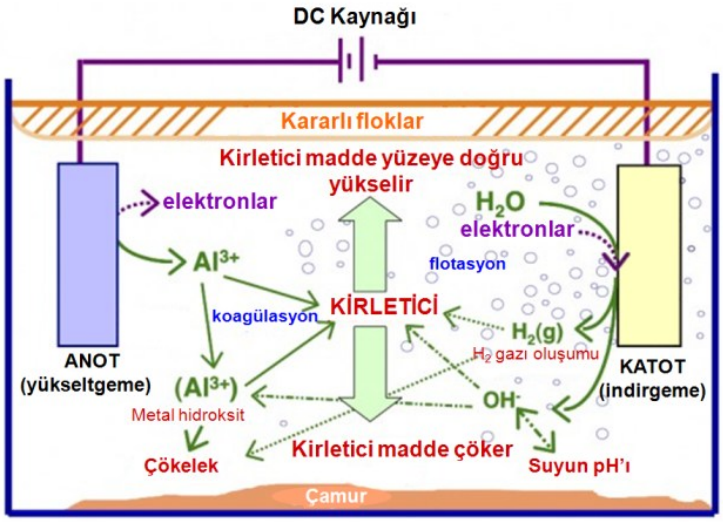
2. Elektrokoagülasyon prosesi

Elektroliz, bir sıvı içerisine daldırılmış iki iletken çubuğa (anot ve katot) elektrik akımı uygulanması sonucunda, anottan çözünen elektronların elektrokimyasal tepkimeleri tetiklemesidir. Elektrokoagülasyon ise atık suda elektroliz uygulanmasıdır. Elektrokoagülasyon süreci, elektroliz sonucunda anot metalinin çözünmesi ve katot metalinde hidroksil iyonları oluşması ile arıtılması istenen atık suyun içerisinde metal hidroksit floklarının meydana gelmesi prensibine dayanır [11]. Anot metalinin çözünmesi ve katot metalinde oluşan hidroksil iyonları (OH^-) ile birleşmesi sonucunda atık su içerisinde metal hidroksit flokları meydana gelir. Oluşan bu metal hidroksit flokları sudaki kirlilikleri tutarak suyun temizlenmesini sağlamaktadırlar.

Elektrokoagülasyon prosesinde verimi ve ekonomik uygunluğu sebebiyle sıklıkla demir (Fe) ve alüminyum (Al) elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotlar atık suyun iletkenlik, pH gibi parametrelerine de bağlı olarak çözünerek, sıvı içerisine Al^{3+}, Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları (OH^-) ile birleşerek sıvı içinde çok az çözünen $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır [6].

Şekil 1'de elektrokoagülasyon prosesinin oluşum mekanizması alüminyum anot için verilmiştir. Katot metali ise herhangi bir metal olabilmektedir (alüminyum, demir, paslanmaz çelik vb.). Anot ve katoda doğru akım uygulanmakta, elektron akışı sayesinde anottan Al^{3+} iyonları koparılmaktadır. Benzer şekilde elektron transferi sonucunda su (H_2O) molekülleri parçalanarak hidrojen gazı (H_2) ve hidroksil iyonları (OH^-) oluşmaktadır. Al^{3+} katyonlarının sudaki kirleticiler ile tepkimesi sonucu çözelti dibinde çöken bir çamur oluşmakta ve sudaki kirlilik giderilmektedir. Ayrıca $Al(OH)_3$ metal hidroksitlerinin absorbe ettiği kirletici maddeler suyun yüzeyinde kararlı floklar şeklinde biriktiği gibi, yoğunluğu fazla olan kirletici maddeler de çökerek çamur oluşturur [7].

Elektrokoagülasyon prosesinde meydana bu iki tepkime sonucunda başta kirli olarak bulunan su, alt kısımda çökmüş kirliliklerin oluşturduğu çamur, orta kısımda arıtılmış su ve üst kısımdaki kararlı flokların oluşturduğu yüzen kirlilikler olmak üzere 3 faza ayrılır.



Şekil 1. Elektrokoagülasyon prosesi oluşum mekanizması [8]

3. Elektrokoagülasyon prosesini etkileyen faktörler

Elektrokoagülasyon prosesi kirleticileri sudan uzaklaştırmak için sinerjik olarak çalışan çok sayıda mekanizmaya sahip karmaşık bir süreçtir [9]. Elektrokoagülasyon prosesi kullanılan elektrotların cinsi, elektrotların bağlantı şekli, elektrotların yerleşiminin yanı sıra elektrotlar arası mesafe, elektrotlara uygulanan akım, elektrot yüzeyindeki akım yoğunluğu, çözeltiye eklenen destek elektrolit derişimi, çözeltinin iletkenliği, çözeltinin pH değeri, çözelti sıcaklığı ve prosesin süresi gibi pek çok faktörden etkilenmektedir [5-10]. Literatür incelendiğinde elektrokoagülasyon prosesinin tekstil endüstrisi atık suları, kâğıt endüstrisi atık suları, hastane atık suları, içme suları, mezbaha atık suları, süt endüstrisi atık suları, sızıntı suları, zeytinyağı sanayi atık suları ve gıda sanayi atık suları gibi birçok farklı atık suya uygulandığı görülmektedir [12-20]. Bu derleme makalesinde sırasıyla elektrokoagülasyon prosesini etkileyen faktörlerden pH, iletkenlik, sıcaklık, elektrot bağlantı şekilleri ve akım yoğunluğu parametreleri ele alınmıştır.

3.1 pH

Elektrokoagülasyon prosesinde kimyasal tepkimeler ortamın pH değerine göre değişmektedir. Ortamın pH değeri proseste ortaya çıkan ara ürünleri ve tepkimeleri belirlemektedir [21]. Çözeltinin pH değeri çözeltinin iletkenliği, elektrotların çözünmesi, metal hidroksitlerin oluşması ve koloidal parçacıkların zeta potansiyeli üzerinde etkisi vardır. Öte yandan elektrokoagülasyon prosesi sırasında pH artar, bu da onu sürekli değişen bir parametre haline getirir [9]. Tekstil atık sularında yapılan bir çalışmada asidik koşullar altında OH^- konsantrasyonunun metal hidroksit türlerinin oluşumu için yeterli olmadığı görülmüştür. Buna karşılık, alkali koşullar altında, metal hidroksit oluşumunun kolaylıkla gerçekleştiği gözlemlenmiştir [22].

3.2 İletkenlik

Atık suyun iletkenlik değeri elektrik sarfiyatı ile doğrudan ilişkilidir. Sabit akım ve değişken gerilim uygulanarak yapılan bir elektrokoagülasyon prosesinde, atık suyun iletkenlik değeri arttığında, direnç azalacağı için Ohm yasasına (1) göre uygulanan gerilim değeri de azalacaktır. Aynı akım değerinde daha düşük gerilim uygulanacağı için enerji maliyeti azalacaktır (2).

$$V = I\ x\ R \quad (1)$$

$$P = V\ x\ I \quad (2)$$

Denklemlerde V gerilimi (Volt), I akımı (Amper), R direnci (Ohm) ve P gücü (Watt) göstermektedir. Atık suya çözeltinin iletkenliğini artırmak ve elektrik tüketimini azaltmak için destek elektrolitik eklenmektedir [6, 10, 21]. Çözeltinin iletkenliği elektrolitin türüne ve konsantrasyonuna bağlıdır. $NaCl$, Na_2SO_4 ve KCl gibi farklı elektrolit türleri mevcuttur. Elektrolitik iletkenliği artırmak için çözeltiye genellikle $NaCl$ eklenir [9].

3.3 Sıcaklık

Atık su sıcaklığındaki artışın elektrokoagülasyon prosesinde kirliliklerin giderilmesiyle ters bir ilişkisi mevcuttur. Elektrokoagülasyon prosesi esnasında meydana gelen kirlilik giderici metal hidroksitler düşük sıcaklıklarda suda çözünmeyerek yüzeyde floklar halinde ve çözelti dibinde çamur halinde birikerek suyun arıtılmasını sağlarken, atık su sıcaklığı arttıkça metal hidroksitlerin de çözünürlüğü artmaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda kirlilik giderici metal hidroksitler çözünerek suya karışır ve suyu tekrar kirletir [7]. Atık su sıcaklığındaki artış iletkenliği de etkilemektedir. Sıcaklık arttıkça çözeltinin akışkanlığı artmakta, iyonlar çözelti içinde daha kolay hareket edebilir hale gelmektedir. Sonuç olarak su sıcaklığının artmasıyla iletkenlik de artmaktadır. Öte yandan sıcaklığın artışı devam ettiğinde iyonlar birbirleri ile çarpışmakta ve çözelti içinde daha zor hareket etmeye başlamaktadırlar. Bu durumda da iletkenlik azalmaktadır [23]. Yapılan çalışmalarda iletkenliğin 60 ℃'ye kadar arttığı ancak daha yüksek sıcaklıklarda azaldığı gözlemlenmiştir. Sıcaklıkla birlikte iletkenliğin artmasının bir nedeni de katot yüzeyinde oluşan metal oksit film tabakasının sıcaklık arttıkça elektrot yüzeyinden sökülmesidir [24, 25].

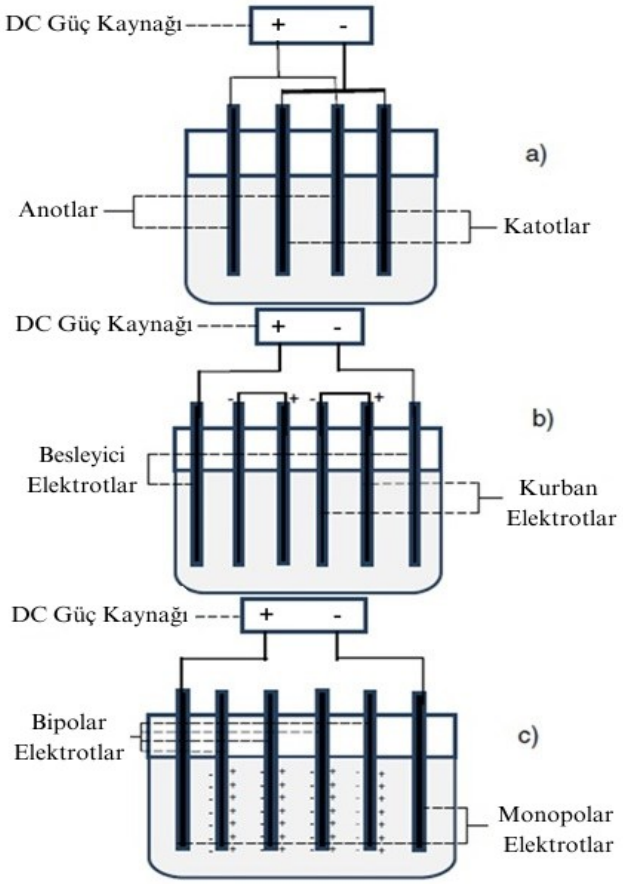
3.4 Elektrot bağlantı şekilleri

Literatür incelendiğinde çalışmaların çoğunlukla durgun atık suda gerçekleştirildiği ve elektrokoagülasyon prosesi deneylerinin plaka şeklinde anot ve katot metalleri kullanmak suretiyle yapıldığı görülmektedir. Plaka şeklindeki anot ve katotların bağlantı şekilleri incelendiğinde monopolar paralel (MP-P), bipolar paralel (BP-P) ve monopolar seri (MP-S) gibi farklı bağlantı şekilleri kullanılarak reaktörler tasarlanmıştır. Öte yandan döner anot-sabit katot veya akışkan suda uygulanan silindirik anot-katot gibi farklı elektrokoagülasyon reaktörü tasarımları da mevcuttur.

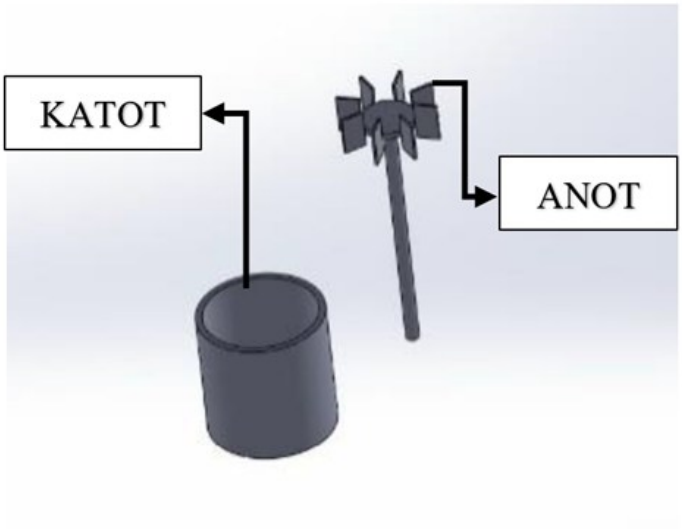
Şekil 2(a)'da verilen monopolar paralel plaka bağlantısı en sık kullanılan bağlantı türüdür. DC güç kaynağından sağlanan doğru akım vasıtasıyla anottan katoda elektron akışı sağlanmaktadır. 4 plaka kullanıldığı için 2 ayrı anot-katot plaka arasındaki alanda elektrokoagülasyon prosesi gerçekleşmektedir. Şekil 2(b)'de verilen monopolar seri reaktör tasarımında elektrik akımı uygulanan monopolar anot ve katodun arasına yerleştirilen, birbirine dahili olarak bağlı olan elektrot çiftine kurban elektrot adı verilmektedir [10]. Merkezde bulunan her bir kurban elektrot çifti birbirine dahili olarak bağlıdır ve iki dış elektrotla hiçbir ara bağlantısı yoktur. Bu durumda, tüm elektrotlardan geçen elektrik akımı aynıdır, oysa genel voltaj, her bir elektrolitik hücredeki voltajın toplamıdır. Bu tasarımda, akım uygulanan anot ve katot arasındaki mesafe artmakta ve

reaktör ortasına eklenen çözünen anotlar elektronları tutmaktadır. Dolayısıyla monopolar anottan katoda elektron transferini sağlamak amacıyla diğer tasarımlara kıyasla daha fazla gerilim uygulamak gerekmektedir. Bu da aynı verimi elde etmek için daha fazla enerji uygulanması ve maliyetin artması anlamına gelmektedir. Güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasına yerleştirilmiş, elektrik akımı uygulanmayan çözünen anotlardan oluşan bipolar paralel elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı Şekil 2(c)'de verilmiştir. Elektrotlara akım uygulandığında oluşan manyetik alan sayesinde, reaktörün ortasında bulunan tükenen anotların bir yüzü anot bir yüzü katot gibi davranmaktadır.

Topal çalışmasında daha önce literatürde bulunmayan bir elektrokoagülasyon reaktör tasarımını kullanmıştır. Şekil 3'de gösterilen tasarımda kullanılan silindirik katodun boyu 10 cm, çapı ise 8.2 cm'dir. Anot ise her bir bıçağı 1.8 cm x 3 cm boyutlarında olan 8 bıçaklı disk türbin tipi bir karıştırıcıdır. Anot ve katot materyali olarak demir ve alüminyum kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Deneyler durgun suda, karıştırıcı anodun silindirik katot içerisine eş merkezli olarak yerleştirilip doğru akım uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Diğer tasarımlardan farklı olarak anot elektrot, kimyasal tepkimelerin gerçekleşmesi için gereken elektron akışını sağlamanın yanında atık suyun karışması ve çözünen iyonların atık su içerisinde dağılması görevini de üstlenmektedir. Böylelikle atık su içerisinde flok oluşumu da desteklenmektedir [21].

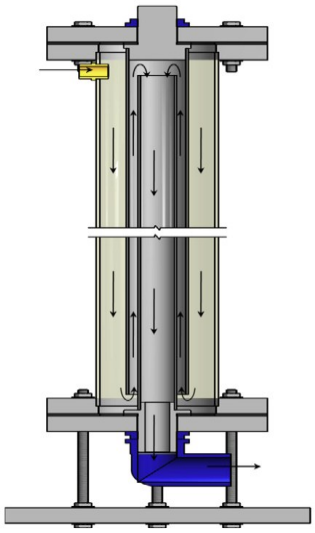


Şekil 2. Elektrotların bağlantı şekilleri [10]
(a) Monopolar paralel (b) Monopolar seri (c) Bipolar paralel



Şekil 3. Elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı [21]

Ardhan vd. yaptıkları çalışmada sürekli akışlı ve kesikli tip elektrokoagülasyon reaktörlerinin performansını kıyaslamışlardır. Deneylerinde kullandıkları sürekli akışlı elektrokoagülasyon reaktörü Şekil 4'de verilmiştir. Sürekli akış sistemi, etkin hacmi 1.5 L olan silindirik bir tüp, bir elektrot düzeneği, bir besleme pompası ve bir DC güç kaynağı ünitesinden oluşmaktadır. Katot olarak 3.2 cm çapında ve 100 cm uzunluğunda içi boş silindir şeklinde demir tüp, anot olarak ise 5.1 cm çapında ve 100 cm uzunluğunda içi boş silindir şeklinde demir tüp kullanılmıştır. Elektrotlar, anodun iç yüzeyi ile katodun dış yüzeyi arasında 7.5 mm boşluk olacak şekilde eş merkezli bir konfigürasyonda monte edilmiştir [26]. Elektrotların yerleşimi dolayısıyla tasarım, tüp içinde tüp elektrokoagülatör olarak da adlandırılır. Anot ve katodun dışında yalıtkan silindir şeklinde bir tüp bulunmaktadır. Atık su Şekil 4'de sol üst tarafta gösterilen girişten sisteme dahil olmakta ve ok yönlerini takip ederek ilerlemektedir. Su anot ve katot arasından yukarıya doğru çıkarken gerçekleşen elektrokoagülasyon prosesi sonucunda arıtma gerçekleşmektedir. Sonrasında katodun içinden akan su çökeltme tankına iletilmekte ve burada fazlara ayrışmaktadır [26].



Şekil 4. Sürekli akışlı tip elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı [26]

3.5 Akım yoğunluğu

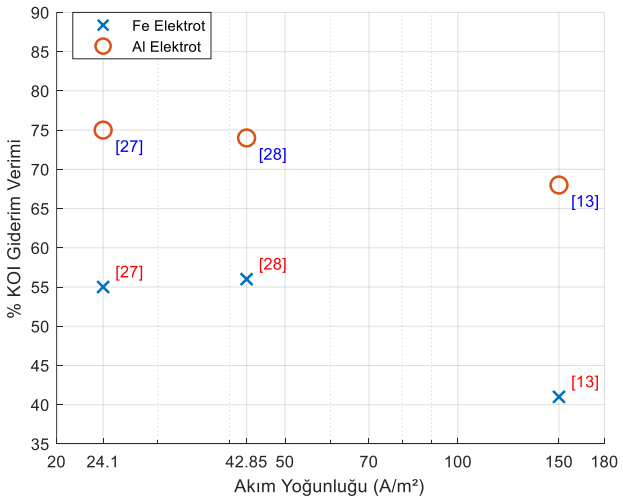
Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğu, anottan çözünen metal miktarını, koagülant dozajını, çözeltide oluşan hidrojen gazı miktarını, katotta biriken metal miktarını, çözeltinin karışmasını, sıcaklığını ve kirlilik giderim verimini etkilediği için çok önemli bir parametredir [6-8]. Bu faktörlere ek olarak akım yoğunluğunun elektrokoagülasyon prosesinde doğrudan kontrol edilebilir tek operasyonel parametre olması oldukça kritiktir [9].

Akım yoğunluğu arttıkça anottan çözünen metal miktarı, oluşan hidrojen gazı miktarı ve çözeltideki metal hidroksit miktarı artar, bu da sıvıdaki AKM, KOİ, BOİ ve renk gibi kirlilik parametrelerinin giderilmesini sağlamaktadır. Akım yoğunluğunun artışı bir doyum noktasına kadar suyun arıtılma süresini kısaltıp, arıtma verimini artırsa da belirli bir değerden sonra kirlilik giderim verimi çok fazla değişmeyecektir. Öyle ki akım yoğunluğu arttıkça elektrotlar ısınacağı için atık suyun sıcaklığı da artacak bu da arıtım verimini olumsuz yönde etkileyecektir. Akım yoğunluğunun gereğinden fazla olması anot metalini daha fazla çözeceği için anot metalinin değişim periyodu kısalacak ve anot değişim maliyeti artacaktır. Suyun arıtılabileceği optimum akım değerinden fazla akım uygulamak elektrik maliyetlerini de artıracaktır. Dolayısıyla en kısa sürede, en az maliyetle ve en verimli arıtım için optimum akım yoğunluğu belirlenmelidir [1,9].

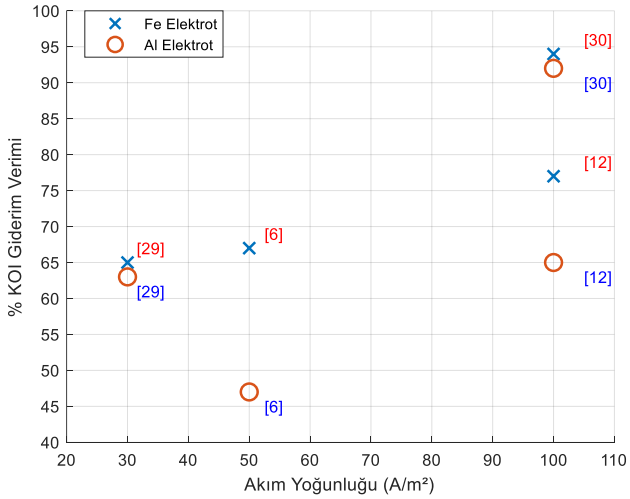
Şekil 5'de farklı kağıt endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrotlar kullanarak ve farklı akım yoğunluklarında yapılmış elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen %KOİ giderim sonuçları verilmiştir. Uğurlu vd. KOİ değeri 426.03 mg/L olan atık suyu 0.25 L hacimli kapta, 24.1 A/m^2 akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %55 KOİ giderim verimi ile arıtırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %75 KOİ giderim verimi elde etmiştir [27]. Yine Uğurlu KOİ değeri 426 mg/L olan atık suyu 0.25 L hacimli kapta, 42.85 A/m^2 akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %56 KOİ giderim verimi ile arıtırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %74 KOİ giderim verimi elde etmiştir [28]. Zodi vd. KOİ değeri 285 mg/L olan atık suyu 2.5 L hacimli kapta, 150 A/m^2 akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %41 KOİ giderim verimi ile arıtırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %68 KOİ giderim verimi elde etmiştir [13]. Çalışmalar incelendiğinde kağıt endüstrisi atık sularında, MP-P bağlantı konfigürasyonunda Al elektrot kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi sonucunda, Fe elektrot kullanılarak yapılan çalışmalara kıyasla, daha yüksek %KOİ giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Genel itibarıyla akım yoğunluğu arttıkça %KOİ giderim veriminin de arttığı görülmektedir.

Şekil 6'da farklı tekstil endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrotlar kullanarak ve farklı akım yoğunluklarında yapılmış elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen %KOİ giderim sonuçları verilmiştir. Bayramoğlu vd. KOİ değeri 2031 mg/L olan atık suyu 1.32 L hacimli kapta, 30 A/m^2 akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %65 KOİ giderim verimi ile arıtırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %63 KOİ giderim verimi elde etmiştir [29]. Kobya vd. KOİ değeri 1513 mg/L olan 3.5 L atık suyu, 50 A/m^2 akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak yaptığı çalışmada %67 KOİ giderim verimi ile arıtırken; KOİ değeri 1341 mg/L olan 3.5 L atık suyu, 50 A/m^2 akım yoğunluğu uygulayarak ve Al elektrot kullanarak %47 KOİ giderim verimi ile arıtmıştır [6]. Bayramoğlu vd. KOİ değeri 3422 mg/L olan 0.25 L atık suyu, 100 A/m^2 akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak %77 KOİ giderim verimi ile arıtırken; aynı şartlar altında Al elektrot kullanarak %65 KOİ

giderim verimi elde etmiştir [12]. Zodi vd. KOİ değeri 3260 mg/L olan 2 L atık suyu, 100 A/m^2 akım yoğunluğunda Fe elektrot kullanarak %94 KOİ giderim verimi ile arıtırken; aynı şartlarda Al elektrot kullanarak %92 KOİ giderim verimi elde etmiştir [30]. Çalışmalar incelendiğinde tekstil atık sularında, MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe elektrot kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi sonucunda, Al elektrot kullanılarak yapılan çalışmalara kıyasla, daha yüksek %KOİ giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Genel itibarıyla akım yoğunluğu arttıkça %KOİ giderim veriminin de arttığı görülmektedir. Şekil 5 ve 6'da grafikleri verilen çalışmalar Tablo 1'de görülmektedir. Tablo 2'de ise literatürde kağıt ve tekstil endüstrisi atık sularında yapılmış diğer çalışmaların detayları verilmiştir.



Şekil 5. Kağıt endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrot kullanarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinden elde edilen akım yoğunluğu (A/m^2) - %KOİ giderim verimleri



Şekil 6. Tekstil endüstrisi atık sularında MP-P bağlantı konfigürasyonunda Fe ve Al elektrot kullanarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinden elde edilen akım yoğunluğu (A/m^2) - %KOİ giderim verimleri

Tablo 1. Şekil 5 ve 6'da verilen elektrokoagülasyon çalışmaları

Endüstri	Elektrot Cinsi	Başlangıç KOİ (mg/L)	Atık Su Hacmi (L)	Akım Yoğunluğu (A/m^2)	% KOİ Giderim Verimi	Referans
Kağıt	Al	426.03	0.25	24.1	%75	[27]
Kağıt	Fe	426.03	0.25	24.1	%55	[27]
Kağıt	Al	426	0.25	42.85	%74	[28]
Kağıt	Fe	426	0.25	42.85	%56	[28]
Kağıt	Al	285	2.5	150	%68	[13]
Kağıt	Fe	285	2.5	150	%41	[13]
Tekstil	Fe	2031	1.32	30	%65	[29]
Tekstil	Al	2031	1.32	30	%63	[29]
Tekstil	Fe	1513	3.5	50	%67	[6]
Tekstil	Al	1341	3.5	50	%47	[6]
Tekstil	Fe	3260	2	100	%94	[12]
Tekstil	Al	3260	2	100	%92	[12]
Tekstil	Fe	3422	0.25	100	%77	[30]
Tekstil	Al	3422	0.25	100	%65	[30]

Tablo 2. Literatürde kağıt ve tekstil atık sularında yapılan elektrokoagülasyon çalışmaları

Endüstri	Elektrot Cinsi	Bağlantı Şekli	Başlangıç KOİ (mg/L)	Atık Su Hacmi (L)	Akım Yoğunluğu (A/m^2)	% KOİ Giderim Verimi	Referans
Tekstil	Al	MP-S	1364	3.5	30	%63	[6]
Tekstil	Fe	MP-S	1398	3.5	30	%54	[6]
Tekstil	Al	BP-S	1513	3.5	40	%56	[6]
Tekstil	Fe	BP-S	1410	3.5	40	%62	[6]
Tekstil	Fe	MP-P	1500	1	92.5	%61	[31]
Tekstil	Al	MP-P	3422	0.25	100	%50	[32]
Kağıt	Fe	MP-P	623	3	20.7	%87.8	[33]
Kağıt	Fe	MP-P	2950	6	60	%82	[34]
Kağıt	Fe	MP-P	1700	1.5	700	%88.4	[7]
Kağıt	Al	MP-P	1700	1.5	700	%80	[7]
Kağıt	Al	MP-P	7960	0.3	140	%98	[35]
Kağıt	Al	MP-P	620	0.3	150	%90	[36]
Kağıt	Fe	Döner Anot	1220	0.5	30	%84	[21]
Kağıt	Al	Döner Anot	1220	0.5	30	%82	[21]

4. Modelleme ve kontrol yöntemleri

Elektrokoagülasyon prosesi çok farklı parametrelerden etkilenen karmaşık bir sistem olması sebebiyle matematiksel olarak modellenirken basit lineer denklemlerle aşılamayan birçok problem bulunmaktadır [37]. Bu sebeple doğrusal olmayan ve karmaşık girdi-çıktı verileri içeren sistemleri öğrenip modelleyebilen Yapay Sinir Ağları (YSA), elektrokoagülasyon sistemlerinin modellenmesi, çıkış verilerinin tahmin edilmesi ve prosesin kontrolünde kullanılabilmektedir. Çalışmanın bu bölümünde, elektrokoagülasyon prosesinin modellenmesi ve prosesi etkileyen faktörlerin kontrol yöntemleri hakkında literatürde yapılan çalışmalar derlenmiştir.

Camcıoğlu, yaptığı çalışmada, yıllık 80000 ton üretim kapasitesine sahip kâğıt fabrikasından alınan atık su numunelerinin elektrokoagülasyon yöntemiyle kesikli sistemde arıtımını analiz etmiştir. Sistemde, iletkenlik, pH ve sıcaklık kontrol edilen ana değişkenler olarak tanımlanırken; destek elektrolit, asit-baz akış hızı ve soğutma suyu akış hızı ayarlanabilir değişkenler olarak seçilmiştir. Bu değişkenlerin yönetimi, MATLAB/Simulink platformu kullanılarak PID kontrol mekanizması, Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (GÖK) ve Genelleştirilmiş Minimum Varyans (GMV) kontrol stratejileriyle sağlanmıştır. Süreç, sabit akım koşullarında tek girdili-tek çıktılı ve çok girdili-çok çıktılı olmak üzere iki farklı yapılandırmada test edilmiştir. GMV kontrolüyle yürütülen çok girdili-çok çıktılı arıtma sürecinin sonuçları, kontrolsüz arıtma süreciyle kıyaslandığında, KOİ gideriminde %9.96 oranında artış, enerji tüketiminde ise %37.49 oranında azalma sağlamıştır. Camcıoğlu yaptığı bu çalışmada, literatürde ilk kez Cevap Yüzey Yöntemi (CYY) kullanarak elektrokoagülasyon süreci için optimal işletme parametrelerini belirlemiş ve geleneksel ile ileri kontrol yöntemlerinin atık su arıtımında nasıl kullanılabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, elde edilen veriler, arıtma performansının artması ve maliyetlerin düşmesi sayesinde bu yöntemin endüstriyel uygulamalar için cazip bir seçenek haline geldiğini ortaya koymuştur [8].

Demirci vd. pamuklu tekstil endüstrisinden elde edilen atık suların elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımını gerçekleştirmiştir. MATLAB/Simulink programını kullanılarak pH, iletkenlik ve sıcaklık parametrelerini bulanık kontrol yöntemi ile eş zamanlı olarak kontrol edilmiştir. Kontrolsüz yapılan deneylerde bulanıklık, renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla %75.7, %72.8 ve %66.2 iken; bulanık kontrol yönteminin kullanıldığı çalışmalarda bulanıklık, renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla %91.6, %88.9 ve %76.2 elde edilmiştir. Ayrıca, bulanık kontrol ile enerji tüketimi optimize edilmiştir. Dinamik davranışta 19.1 V olan voltaj değeri, bulanık kontrol ile 12.6 V değerine düşürülmüş, bu da enerji tüketiminde düşüş sağlamıştır. Sonuçlara göre, bulanık kontrol ile yapılan deneylerde tüm parametrelerde belirgin bir verimlilik artışı görülmüştür [38].

Safonyk vd. galvanik kaplama tesisi atık sularında nikel iyonlarının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımını gerçekleştirmiştir. MATLAB/Simulink programı aracılığıyla oransal kontrol yöntemi kullanılarak akım yoğunluğu kontrol edilmiştir. Siemens S7-300 PLC kullanılarak prosesin tam otomatik kontrolü sağlanmıştır. Enerji tüketimi açısından bakıldığında, sistemin kontrolsüz çalışması durumunda harcanan enerji miktarı günlük 44.9 kWh iken, kontrol sistemi uygulandığında bu tüketim 35.3 kWh'e düşmüştür. Bu da sistemin enerji tüketiminde yaklaşık %21.4 oranında bir tasarruf sağladığını göstermektedir [39].

Camcıoğlu vd. kağıt endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon ile arıtıldığı bir proseste MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan PID kontrol ediciyi kullanarak pH kontrolünü gerçekleştirmiştir. Başlangıç pH değeri 5 olan kağıt endüstri atık suyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle kontrolsüz olarak arıtılması sonucunda %10.07 ile %57.96 aralığında değişen bulanıklık giderim verimi elde ederken, pH değeri süreç boyunca 5'e sabitlediğinde ise %98.6 verim elde etmiştir [40].

Elektrokoagülasyon prosesini modellemek amacıyla farklı yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar Tablo 3'de verilmiştir. Kothari vd. kesikli sistemde Brilliant Green boyasının elektrokoagülasyon prosesi ile giderim sürecini modellemek ve optimize etmek için YSA ve CYY kombinasyonunu kullanmıştır. Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) olarak adlandırılan YSA modelinin girdileri zaman, akım yoğunluğu, pH ve NaCl konsantrasyonu iken; çıktıları ise boya giderme verimliliği ve elektriksel enerji tüketimidir. YSA modelinden elde edilen veriler, CYY ile optimize edilmiştir. Oluşturulan modelin boya giderim verimliliği için determinasyon katsayısı (R^2) 0.99 iken, elektrik enerjisi tüketimi için determinasyon katsayısı ise 0.97'dir. Her iki model için de R^2 değerlerinin yüksek olması, YSA-CYY modelinin güvenilir olduğunu ve kullanılan girdilerin hem boya giderim verimliliği hem de enerji tüketimi üzerindeki etkilerini oldukça iyi açıkladığını göstermektedir. Modelleme ve optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum koşullar 10 dakikalık elektroliz süresi, 80 A/m^2 akım yoğunluğu ve 0.5 g/L NaCl konsantrasyonu ile maksimum boya giderim verimliliği %98.77 ve enerji tüketimi 14.88 kWh/kg olarak elde edilmiştir [41].

Shirkoohi vd. yaptığı çalışmada sentetik atık sulardan elektrokoagülasyon yöntemiyle fosfat giderim verimini tahmin etmek amacıyla YSA, Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANBÇS) ve Destek Vektör Regresyonu (DVR) yapay zeka modellerini kullanmıştır. Modelin giriş parametreleri akım yoğunluğu, başlangıç fosfat konsantrasyonu, başlangıç pH değeri, proses süresi ve elektrot tipi olarak belirlenirken; çıkış parametresi ise fosfat giderim verimliliğidir. YSA ve DVR modellerinin hiperparametreleri Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) gibi meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak optimize edilmiştir. Bu sayede, modellerin performansı artırılmıştır. En başarılı sonuçlar hibrit PSO-YSA modelinde elde edilmiştir. Test setlerinde ortalama R^2 değeri 0.981 olarak hesaplanmıştır, bu da modelin fosfat giderimi için yüksek doğrulukla tahmin yaptığını göstermektedir. Çalışma sonucunda fosfat giderimi üzerinde en etkili iki faktör elektrot tipi ve başlangıç fosfat konsantrasyonu olarak belirlenmiştir. Düşük pH ve başlangıç fosfat konsantrasyonu ile daha yüksek akım yoğunluğu ve işlem süresi fosfat giderim verimliliğini artırdığı gözlemlenmiştir [42].

Graça vd. içme suyundan sürekli akışlı elektrokoagülasyon yöntemiyle florür giderim prosesini modellemek için çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA modeli kullanmıştır. Modelin giriş parametreleri akım yoğunluğu, debi, girişteki florür konsantrasyonu, işlem süresi ve elektrot konfigürasyonu iken; çıkış parametreleri ise proses çıkışındaki suda bulunan florür konsantrasyonu ve uygulanan voltajdır. Modelin determinasyon katsayısı 0.999 olarak elde edilmiştir. Model parametrelerinin optimizasyonu GA kullanılarak yapılmıştır. Optimum şartlarda giriş florür konsantrasyonu 10 mg/L olan 5 litre içme suyunun florür konsantrasyonunu 1.5 mg/L'nin altına düşürmek için akım 88.3 mA, debi 73.6 mL/dakika ve elektrot konfigürasyonu olarak MP-S yapı seçilmiş, bu koşullarda %85 florür giderimi sağlanmış ve işletme maliyeti 0.05 €/L olarak hesaplanmıştır [43].

Obi vd. mezbaha atık suyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımını modellemek için YSA ve ANBÇS modellerini, optimizasyon için ise GA ve PSO algoritmalarını kullanmıştır. ANBÇS modeli, YSA modeline kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir. ANBÇS için ortalama kare hata $8\,x\,10^{-10}$, R^2 değeri ise 0.9993 olarak hesaplanmıştır. ANBÇS modeli, daha düşük hata oranı ile daha yüksek bir doğruluk sağlamış ve YSA modeline kıyasla sistemin girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkileri daha iyi öğrenmiştir. Modelleme sonuçlarına dayanarak, elektrokoagülasyon sürecinin optimize edilmesi, sürecin en uygun şartlarda çalıştırılarak maksimum verim alınması ve minimum enerji tüketimi sağlanması hedeflenmiştir. Optimum şartlarda en yüksek bulanıklık giderimi %99.39 olarak belirlenmiştir. Enerji tüketimi 293.33 kWh/m³ ve elektrot çözünme miktarı 0.2237 g olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ekonomik olarak en uygun koşulları sağlamış ve minimum enerji ve malzeme kaybı ile maksimum verim elde edilmiştir [44].

Tablo 3. Elektrokoagülasyon prosesini modelleme çalışmaları

Modelleme Yöntemi	R^2 Uyumu	Referans
CYY-YSA	0.99	[41]
PSO-YSA	0.981	[42]
YSA	0.999	[43]
ANBÇS	0.9993	[44]
ANBÇS -PSO	0.9968	[45]
VOK-Freundlich	0.9226	[46]
PSO	0.90	[47]
YSA	0.995	[48]
YSA	0.973	[49]

5. Sonuç ve öneriler

Elektrokoagülasyon, ağır metaller, organik kirleticiler ve renk gibi su kirliliğine yol açan maddelerin gideriminde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel arıtma yöntemlerine göre daha düşük enerji tüketimi, daha az kimyasal ihtiyacı ve kısa işlem süresi gibi avantajlara sahiptir. Ancak, prosesin verimliliği; akım yoğunluğu, elektrot tipi, iletkenlik, pH ve sıcaklık gibi birçok değişkene bağlıdır. Bu parametrelerin optimize edilmesi, prosesin maliyet etkinliğini ve verimini artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, elektrokoagülasyon prosesinin temel çalışma prensibi, prosesi etkileyen faktörler, prosesin verimini artırmak ve enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla geliştirilen modelleme ve kontrol yöntemleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Tekstil ve kağıt endüstrisi atık suları üzerinde literatürde yapılan çalışmalar incelenerek, parametrelerin proses üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akım yoğunluğunun %KOİ giderimi arasında doğrusal bir bağlantı olduğu görülmüştür. Tekstil endüstrisi atık sularında Fe elektrotun, kağıt endüstrisi atık sularında Al elektrotun %KOİ gideriminde daha verimli olduğu gözlenmiştir. PID ve bulanık kontrol gibi kontrol mekanizmaları ile proses parametrelerinin kontrol edilmesi sonucunda %KOİ giderim veriminin arttığı ve enerji maliyetlerinin azaldığı görülmüştür. YSA ve ANBÇS gibi yapay zeka tabanlı modeller, elektrokoagülasyon prosesinde pH, akım yoğunluğu, sıcaklık gibi çok sayıda

değişkenin etkilerini modelleyerek optimum koşulları belirlemektedir. Yapay zeka tabanlı yapılan modelleme çalışmalarında, yüksek determinasyon katsayıları elde edilerek, modelin proses çıktıları üzerindeki tahmin gücü kanıtlanmıştır. Yapay zeka tabanlı modellerin belirsizliklerin ve değişken koşulların hakim olduğu sistemlerde hassas bir kontrol sağlayarak enerji tüketimi ve elektrot çözünmesi gibi maliyet artırıcı unsurları minimize ettiği görülmüştür.

Sonuç olarak, YSA, ANBÇS ve PID gibi modelleme ve kontrol yöntemlerinin entegrasyonu, elektrokoagülasyon prosesinin endüstriyel uygulamalarda daha sürdürülebilir ve enerji verimli bir su arıtma çözümü olarak kullanımını desteklemektedir. Bu yöntemlerin sağladığı optimizasyon ile proses koşullarına adaptasyon sağlanarak, elektrokoagülasyon prosesinin çevre dostu bir su arıtma teknolojisi olarak daha yaygın bir uygulama alanına sahip olması mümkün hale gelmektedir. Gelecekte, bu modelleme ve kontrol tekniklerinin gelişimi, elektrokoagülasyon prosesinin geniş bir endüstri yelpazesinde daha yüksek verimle kullanılabilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Teşekkür

Bu çalışmada sağladıkları değerli destek ve katkılarından dolayı VARAKA Kağıt A.Ş.'ye ve VARAKA AR-GE ekibine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] Chen, G., Electrochemical technologies in wastewater treatment, **Separation and Purification Technology**, 38, 11-41, doi:10.1016/j.seppur.2003.10.006, (2004).

[2] Matteson, M. J., Dobson, R. L., Glenn, R. W., Kukunoor, N. S., Waits, W. H. ve Clayfield, E. R., Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles, **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 104, 101-109, (1995).

[3] Karef, S., Kettab, A., Loudyil, D., Bruzzoniti, M. C., Bubba, M., D., Nouh, F., A., Boujelben, N., ve Mandi, L., Pollution parameters and identification of performance indicators for wastewater treatment plant of Medea (Algeria), **Desalination and Water Treatment,** 65, 192–198, doi:10.5004/dwt.2017.20290, (2017).

[4] Chung, M., C., Hong, W., S., Cho, K. ve Hoffmann, M.R., Degradation of organic compounds in wastewater matrix by electrochemically generated reactive chlorine species: kinetics and selectivity, **Catalysis Today**, 313, 189–195, doi:10.1016/j.cattod.2017.10.027, (2018).

[5] Mao, Y., Zhao, Y. ve Cotterill, S., Examining current and future applications of electrocoagulation in wastewater treatment, **Water**, 15, 8, 1455, doi:10.3390/w15081455, (2023).

[6] Kobya, M., Bayramoğlu, M., Can, O. T. ve Sözbir, M., Endüstriyel atıksuların arıtılması için elektrokimyasal reaktör geliştirilmesi, TÜBITAK Proje No:104Y267, Kocaeli, (2008).

[7] Katal, R. ve Pahlavanzadeh, H., Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment

of paper mill wastewater, **Desalination**, 265, 199-205, doi:10.1016/j.desal.2010.07.052, (2011).

[8] Camcıoğlu, Ş., Kâğıt endüstrisi atık sularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2016).

[9] Sahu, O., Mazumdar, B. ve Chaudhari, P. K., Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review, **Springer Environmental Science and Pollution Research**, 21, 2397–2413, doi:10.1007/s11356-013-2208-6, (2014).

[10] Hakizimana, J. N, Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. ve Naja, J., Electrocoagulation process in water treatment: a review of electrocoagulation modeling approaches, **Desalination**, 404, 1-21, doi:10.1016/j.desal.2016.10.011, (2017).

[11] Süzen, Y., Yonga levha endüstrisi atık sularının kimyasal ve elektrooksidasyon yöntemleriyle arıtımı ve optimizasyonu, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2023).

[12] Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O. T. ve Sozbir, M., Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater, **Separation and Purification Technology**, 37, 117–125, doi:10.1016/j.seppur.2003.09.002, (2004).

[13] Zodi, S., Louvet, J. N., Michon, C., Potier, O., Pons, M. N., Lapicque, F. ve Leclerc, J. P., Electrocoagulation as a tertiary treatment for paper mill wastewater: removal of non-biodegradable organic pollution and arsenic, **Separation and Purification Technology**, 81, 62–68, doi:10.1016/.seppur.2011.07.002, (2011).

[14] Veli, S., Arslan, A. ve Yılmaz, E., Elektrokoagülasyon prosesi ile hastane atıksuyunda toplam organik karbon giderimi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 35, 65-78, (2015).

[15] Özyonar, F. ve Karagözoğlu, B., İçme sularından elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile bulanıklığın giderimi, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 27, 1, 81-89, (2012).

[16] Bayar, S., Yıldız, Y. Ş., Yılmaz, A. E. ve İrdemez, Ş., The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method, **Desalination**, 280, 103-107, doi:10.1016/j.desal.2011.06.061, (2011).

[17] Şengil, İ. A. ve Özacar, M., Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes, **Journal of Hazardous Materials**, 137, 2, 1197-1205, doi:10.1016/j.hazmat.2006.04.009, (2006).

[18] Ricordel, C. ve Djelal, H., Treatment of landfill leachate with high proportion of refractory materials by electrocoagulation: System performances and sludge settling characteristics, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2, 1551-1557, doi:10.1016/j.ece.2014.06.014, (2014).

[19] İnan, H., Dimoglo, A., Şimşek, H. ve Karpuzcu, M., Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation, **Seperation and Purification Technology**, 36, 23-31, doi:10.1016/S1383-5866(03)00148-5, (2004).

[20] Solak, M., Pakdil, N. B., Kılıç, M. ve Kobya, M., Elektrokoagülasyon prosesi ile patates cipsi üretim atıksularından fosfor giderimi: Elektrot materyali karşılaştırması, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 22, 2, 302-313, doi:10.16984/saufenbilder.340123, (2018).

[21] Topal, S., Kâğıt endüstrisi atık sularının elektrokimyasal yöntemi ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2015).

[22] Kurtoğlu Akkaya, G. ve Üçgül İ., Doğrudan güneş enerjisi kullanılarak tekstil atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtımı, **Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi**, 13, 2, 504-516, doi:10.31466/kfbd.1227078, (2023).

[23] Yalçın, H. ve Gürü, M., **Su teknolojisi**, Palme Yayıncılık, Ankara, (2010).

[24] Restrepo, A., Arango, A. ve Garc´es, L., La electrocoagulaci´on: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas, **Produccion+ Limpia** 1, 2, 58-77, (2006).

[25] Ruiz, A. A., La electrocoagulaci´on: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, **Revista Lasallista de Investigación**, 2, 1, 49–56, (2005).

[26] Ardhan, N., Ruttithiwapanich, T., Songkasiri, W. ve Phalakornkule, C., Comparison of performance of continuous-flow and batch electrocoagulators: a case study for eliminating reactive blue 21 using iron electrodes, **Separation and Purification Technology**, 146, 75-84, doi:10.1016/j.seppur.2015.03.028, (2015).

[27] Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç. ve Yalçın, M., The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation, **Journal of Environmental Management**, 87, 420–428, doi:10.1016/j.jenvman.2007.01.007, (2008).

[28] Uğurlu, M., Elektrokoagülasyon yöntemiyle kağıt atık sularında bazı inorganik bileşenlerin giderilmesi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 17, 3, 85-99, (2004).

[29] Bayramoglu, M., Eyvaz, M., ve Kobya, M., Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: economical evaluation, **Chemical Engineering Journal**, 128, 155–161, doi:10.1016/j.cej.2006.10.008, (2007).

[30] Zodi, S., Potier, O., Lapicque, F. ve Leclerc, J. P., Treatment of the textile wastewaterss by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics, **Separation and Purification Technology**, 69, 29–36, doi:10.1016/j.seppur.2009.06.028, (2009).

[31] Lin, S.H. ve Peng, C.F., Treatment of textile wastewater by electrochemical method, **Water Research**, 28, 2, 277–282, doi:10.1016/0043-1354(94)90264-X, (1994).

[32] Can, O. T., Kobya, M., Demirbaş, E. ve Bayramoğlu, M., Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation, **Chemosphere**, 62, 181-187, doi:10.1016/j.chemosphere.2005.05.022, (2006).

[33] Khansorthong, S. ve Hunsom, M., Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique, **Chemical Engineering Journal**, 151, 228-234, doi:10.1016/j.cej.2009.02.038, (2009).

[34] Al-Shannag, M., Lafi, W., Bani-Melhem, K., Gharagheer, F. ve Dhaimat, O., Reduction of COD and TSS from paper industries wastewater using electrocoagulation and chemical coagulation, **Separation Science and Technology**, 47, 5, 700-708, doi:10.1080/01496395.2011.634474, (2012).

[35] Zaied, M. ve Bellakhal, N., Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry, **Journal of Hazardous Materials**, 163, 995-1000, doi:10.1016/j.hazmat.2008.07.115, (2009).

[36] Sridhar, R., Sivakumar, V., Immanuel, V. P. ve Prakash, M. J., Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process, **Journal of**

Hazardous Materials, 186, 1495-1502, doi:10.1016/j.hazmat.2010.12.028, (2011).

[37] Mirsoleimani-azizi, S. M., Salkhordeh-panbechouleh, S. ve Amooey, A. A., Modeling and optimization of current density for electrocoagulation removal of endosulfan by artificial neural network (ANN), **The 9th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2015)**, Shiraz, İran, (2015).

[38] Demirci, Y., Pekel, L. C., Altınten, A. ve Alpbaz, M., Elektrokoagülasyon reaktöründe bulanık kontrol metodu ile pH, iletkenlik ve sıcaklığın eş zamanlı kontrolü, Gazi Üniversitesi, **Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 31, 4, 987-996, doi:10.17341/gazimmfd.278454, (2016).

[39] Safonyk, A., Targoniy, I., Yuriy, M. ve Bomba, A., Research and automation of the process of wastewater treatment electrocoagulation, **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)**, Lviv, Ukrayna, (2018).

[40] Camcıoğlu Ş., Özyurt, B. ve Hapoğlu H., Elektrokoagülasyon yöntemiyle kâğıt atık suyu arıtımında pH kontrolü, Anadolu Üniversitesi, **Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 16, 2, 107-115, doi:10.18038/btd-a.95571, (2015).

[41] Kothari, M. S., Vegad, K. G., Shah, K. A. ve Hassan, A. A., An artificial neural network combined with response surface methodology approach for modelling and optimization of the electro-coagulation for cationic dye, **Heliyon**, 8, 1, e08749, doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08749, (2022).

[42] Shirkoohi, M. G., Tyagi, R. D., Vanrolleghem, P. A. ve Drogui, P., A comparison of artificial intelligence models for predicting phosphate removal efficiency from wastewater using the electrocoagulation process, **Digital Chemical Engineering**, 4, 100043, doi:10.1016/j.dche.2022.100043, (2022).

[43] Graça, N. S., Ribeiro, A. M. ve Rodrigues, A. E., Modeling and optimization of a continuous electrocoagulation process using an artificial intelligence approach, **Water Supply**, 22, 1, 643-658, doi:10.2166/ws.2021.249, (2022).

[44] Obi, C. C., Nwabanne, J. T., Igwegbe, C. A., Abonyi, M. N., Umembamalu, C. J. ve Kamuche, T. T., Intelligent algorithms-aided modeling and optimization of the deturbidization of abattoir wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes, **Journal of Environmental Management**, 353, 120161, doi:10.1016/j.envman.2024.120161, (2024).

[45] Igwegbe, C. A., Obi, C. C., Onyechi, C. C., Davoud, B., Białowiec, A. ve Onukwuli, O. D., Integration of experimental and intelligent modeling for optimizing iron electrocoagulation-flocculation recovery of aquafarm effluent, **Desalination and Water Treatment**, 320, 100832, doi:10.1016/j.dwt.2024.100832, (2024).

[46] Rahman, N. A., Linus, A. A., Jol, A. A., Jalal, N. S. A., Ming, C. K., Borhan, W. W. S. W., Baharuddin, N., Samsul, S. N. A. ve Mutalip, N. A., Kinetic modelling of peat water treatment with continuous electrocoagulation using aluminium electrodes, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 11, 109559, doi:10.10106/j.jece.2023.109559, (2023).

[47] Taşkın, A., Evsel atık suların kimyasal çöktürme ve elektrokoagülasyon arıtımında parçacık sürüsü temelli modelleme ve kontrol yaklaşımı, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2016).

[48] Bhagawatia, P. B., Kumar, K., Lokeshappa, B., Malekdar, F., Sapate, S., Adeogun, A. I., Chapi, S., Goswami, L., Mirkhalafi, S. ve Sillanpää, M., Prediction of electrocoagulation treatment of tannery wastewater using multiple linear regression based ANN: comparative study on plane and punched electrodes, **Desalination and Water Treatment**, 319, 100530, doi:10.1016/j.dwt.2024.100530, (2024).

[49] Ribeiro, T. S., Grossi, C. D., Merma, A. G., Santos, B. F. ve Torem, M. L., Removal of boron from mining wastewaters by electrocoagulation method: modelling experimental data using artificial neural networks, **Minerals Engineering**, 131, 8-13, doi:10.1016/j.mineng.2018.10.016, (2019).

DOI:10.25092/baunfbed. 1576604 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 443-463, (2025)*

Investigation of the environmental consciousness levels of teachers and administrators in Bitlis Province

Hatice KANBUR[1], İbrahim KOÇ[2*]

[1]*Bitlis Eren University, Graduate School, Department of Biology, 13000, Rahva-Bitlis.*
[2]*Mardin Artuklu University, Vocational School of Health Services, 47060, Mardin.*

Geliş Tarihi (Received Date): 31.10.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 19.02.2025

Abstract

One of the current and significant problems of this age is the issue of environmental pollution, which is growing day by day and causing the emergence of other problems. People's consciousness of environmental issues affects the continuation or solution of this problem. This research was studied to investigate the environmental consciousness of teachers and administrators working in schools in Bitlis, Türkiye. The study was studied with 783 teachers and administrators during the spring semester of the 2021-2022 academic year. In the research, a "Demographic Knowledge Form" and the "Environmental Consciousness Scale" were used as data collection tools. Looking at some findings obtained from the research; it was determined that 89.02% of the participants were university graduates; 87.87% were teachers; 91.95% were not members of a non-governmental organization aimed at protecting the environment; 97.83% were interested in environmental issues, and most lived in a small city (78.29%). The level of environmental awareness has been assessed in the subdimensions of attitude, knowledge, and behavior. To determine the level of environmental consciousness, a Likert-type scale was used for analysis, revealing a high level of environmental consciousness (M = 3.81, SD = 0.33). As a result, it was determined that the participants were sensitive to the pollution in their environment and that although they had environmental knowledge and attitudes, they were deficient in turning it into behavior.

Keywords*: Bitlis, environment, environmental consciousness, teacher, administrator*

Hatice KANBUR, htckanbur@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-8206-4395
*İbrahim KOÇ, ibrahimkoc@artuklu.edu.tr, http://orcid.org/0000-0003-0803-680

Bitlis ilindeki öğretmenler ve yöneticilerin çevre bilinci düzeylerinin incelenmesi

Öz

Çağımızın güncel ve önemli sorunlarından bir tanesi de her geçen gün artan ve diğer sorunların ortaya çıkmasına neden olan çevre kirliliği problemidir. İnsanların çevresel konulara dair bilinçleri, bu sorunun devamlılığını veya çözümünü etkilemektedir. Bu araştırma, Bitlis ilindeki okullarda çalışan öğretmenler ve yöneticilerin çevre bilinç düzeyini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma, 2021-2022 akademik yılının bahar döneminde 783 öğretmen ve yönetici ile yapılmıştır. Araştırmada veri toplama araçları olarak "Demografik Bilgi Formu" ve "Çevresel Bilinç Ölçeği" kullanılmıştır. Araştırmadan elde edilen bazı bulgulara bakıldığında; katılımcıların %89,02'sinin üniversite mezunu olduğu; %87,87'sinin öğretmen olduğu; %91,95'inin çevreyi korumaya yönelik bir sivil toplum kuruluşuna üye olmadığı; %97,83'ünün çevresel konulara ilgi duyduğu ve çoğunluğunun küçük bir şehirde yaşadığı (%78,29) tespit edilmiştir. Katılımcıların, çevre bilinci düzeyi, tutum, bilgi ve davranış alt boyutlarında değerlendirilmiştir. Çevre bilinci düzeyini belirlemede, Likert tipi ölçek kullanılarak analiz edilmiş ve çevre bilinci seviyesi yüksek bulunmuştur (M=3.81, SD=0.33). Sonuç olarak; katılımcıların, çevrelerindeki kirliliğe duyarlı oldukları, çevre bilgisi ve tutumlarının olmasına rağmen davranışa dönüştürülmesi konusunda eksikliklerinin olduğu tespit edilmiştir.

***Anahtar kelimeler**: Bitlis, çevre, çevre bilinci, öğretmen, yönetici*

1. Introduction

Humans exploit natural resources, pollute the environment and damage nature. Humans, who do not have a sufficient understanding of nature, are in a difficult process, together with other living beings, as a result of their actions. This process is becoming increasingly severe and painful, manifesting itself in pollution, epidemics, disasters, etc. The root causes of many of the environmental problems we face today are the exploitation of nature by man, along with industrialisation [1, 2]. Environmental problems manifest themselves as problems that reduce the quality of life and sometimes threaten existence [3]. In short, for a livable planet, the necessary steps must be taken as soon as possible, otherwise humans, along with other living beings, will also face extinction. This problem can only be solved by individuals who are environmentally conscious (Figure 1). Environmental education is not only the responsibility of environmental educators. The protection of the environment should be the duty of all of us. A connection should be established between the information provided in all subjects and the conservation of the environment [4].

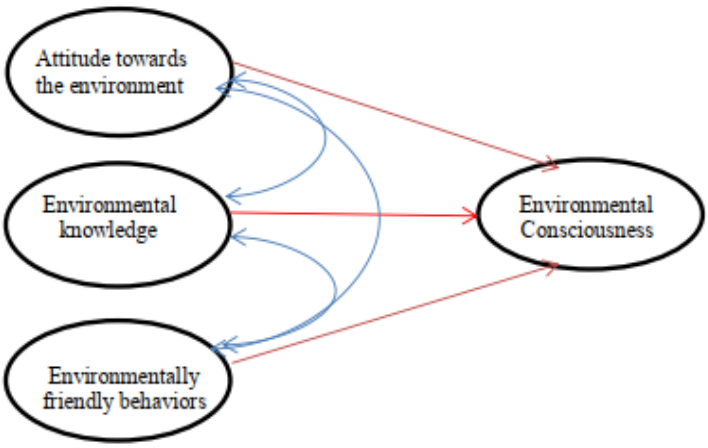


Figure 1. Environmental consciousness and the attitudes, knowledge, and behaviors that constitute environmental consciousness [4].

Environmental education enables individuals to gain more knowledge about the environment, develop their attitudes towards it, and transform these into behavior [5, 6, 7, 8]. Environmental education includes teaching responsible behavior in all areas, including the use of resources, energy consumption, waste production and water consumption. Environmental education should be conducted in three fundamental settings: the home environment, the neighborhood, and the school [9]. Research carried on teachers in the school environment has shown that teacher candidates generally do not have sufficient levels of knowledge and attitudes towards the environment [10].

In a study conducted to determine the national status of the environmental education component of preservice teacher education programs, it was found that most schools have few requirements related to environmental education and that environmental education is not institutionalized in the majority of schools [11]. Çakır (2023) [12] determined that teachers' perceptions of environmental consciousness differ based on their subject and environmental education received. Uzun & İris (2023) [13] revealed that teacher candidates' cognitive perceptions of the concept of environment are inadequate and their consciousness levels regarding environmental issues are limited.

Contrary to these negative findings, [14] stated in their research that teachers generally exhibit a moderate level of commitment to nature and environmental sensitivity. Eyiol et al. (2024) [15] reported that teachers generally possess a high level of environmental sensitivity. Şaşkın & İzgi-Onbaşılı (2023) [16] found that teachers' relationship with nature and their level of environmental consciousness are above average and there is a moderate positive relationship among them. Sakçı & Uyanık (2023) [17] demonstrated that teachers generally exhibit a positive attitude towards environmental issues. Karacaoğlu & Karacaoğlu (2023) [18] reported that physics teachers generally possess environmental sensitivity, particularly regarding air, water, soil pollution, and ecological balance. Fidan-Yazgan (2023) [19] stated that science and elective environmental education programs implemented in primary and secondary schools in Türkiye generally focus on the knowledge component, but there are significant deficiencies in the skills, consciousness, attitude, and especially behavior components. Demir & Ulukaya-Öteleş (2023) [20] emphasized the importance of increasing environmental consciousness and global cooperation, suggesting that environmental education should be strengthened in this regard. In conclusion, various studies have highlighted that education provided by

environmentally conscious teachers can positively change children's attitudes towards the environment [6, 7, 8, 21, 22, 23, 24, 25].

In the province of Bitlis (Türkiye), where this research was studied, it has been observed that natural resources are being polluted (for example, the Bitlis River), there is litter and debris in the surroundings, and the air quality is severely compromised, especially during winter [26]. Observations indicate that the public is indifferent to these issues. A generation that is sensitive to the environment can only be nurtured through families, surroundings, and conscious teachers and administrators. It is believed that students raised by teachers and administrators with environmental awareness in schools will contribute to a cleaner Bitlis through this research. As seen in the studies mentioned above, environmental education given in schools is of vital importance in raising environmental consciousness students. A qualified environmental education is possible with environmental consciousness administrators and teachers in schools. In line with this purpose, first of all, the environmental consciousness levels of teachers and administrators working in schools in Bitlis Province should be determined.

The aim of this research is to determine the level of environmental consciousness of teachers and administrators working in schools (pre-school, primary, secondary and high school) affiliated to the Bitlis Provincial Directorate of National Education (Türkiye), as well as the relationships between these levels of consciousness and certain variables (age, gender, education level, professional experience, etc.).

2. Materials and methods

The universe of this research consists of teachers and administrators working at different official education levels (preschool, primary school, secondary school, and high school) in Bitlis province center. In the year the research was studied, it was determined that there were 142 schools and 1,287 teachers and administrators. It was observed that 19 of these schools did not have teachers or administrators. Due to time constraints and economic resources, it was preferred to take samples from the universe instead of reaching the entire universe. The random sampling method was used because of the high power of representing the universe and the equal or independent probability of sampling units being selected as a sample [27]. This research was studied in the spring semester of the 2021-2022 academic year.

2.1. Participants

The participants of the study consisted of 783 volunteers (87.87% (n=688) teachers and 12.13% (n=95) administrators) working in schools (Table 1) affiliated with the Bitlis Provincial Directorate of National Education.

Table 1. Distribution of participants according to school type

School Type	Number of Participating Schools	Number of Participating Volunteers
Preschool	4	17
Primary school	20	225
Secondary school	23	342
High school	18	199
Total	65	783

2.2. Data collection tools

The data collection tools used in the study included the "Environmental Consciousness Scale" (ECS) adapted by Prof. Dr. Sinan ERTEN[4], and the "Demographic Knowledge" (Table 2) section consisting of various open-ended questions about the environment. The ECS was developed by [28] and adapted to Turkish by [4]. Permission has been obtained for the use of the scale. This scale consists of 60 questions across three dimensions: 20 items related to environmental knowledge, 20 items related to attitudes towards the environment, and 20 items related to behaviors aimed at protecting the environment. The scale has previously undergone factor analysis and has been used in many studies in Türkiye. The statements in the scale are rated on a 5-point Likert scale ranging from strongly agree to strongly disagree, with options including: strongly agree, agree, somewhat agree, disagree, and strongly disagree, as well as frequency options: very often, often, sometimes, rarely, and never [29]. The findings obtained from the research were analyzed at a 95% confidence level. To examine the distribution of teachers' demographic characteristics, frequency and percentage values were provided, while mean and standard deviation values were used to reveal the levels of environmental consciousness.

Table 2. Demographic knowledge form

Questions	**Options**
Gender:	Female ( ) Male ( )
Your age:	20-25 ( ) 26-30 ( ) 31-35 ( ) 36-40 ( ) 41 and Above ( )
Department you graduated from:	…….
Your Education Status:	Associate Degree ( ) Bachelor's Degree ( ) Master's Degree ( ) Doctorate ( )
Your Role at School:	Administrator ( ) Teacher ( )
Length of Service in the Profession:	0-5 Yıl ( ) 6-10 Yıl ( ) 11-15 Yıl ( ) 16-20 Yıl ( ) 21 Years and Above ( )
Have you received any training regarding the environment?	Yes ( ) No ( )
If you received environmental education, at what level of education did you receive it?	Primary Education ( ) High School ( ) Associate Degree ( ) Bachelor's Degree ( ) Other ( )
Are you a member of any non-governmental organizations that work to protect the environment?	Yes ( ) No ( )
Do environmental issues concern you?	Yes ( ) No ( )
Do you have any organisms (plants or animals) that you care for at home?	Yes ( ) No ( )
What kind of place did you live in when you were a child?	Village ( ) Town ( ) District ( ) Small Town ( ) Big City ( )
What type of settlement do you currently live in?	Village ( ) Town ( ) District ( ) Small Town ( ) Big City ( )
How often did you go to natural environments (forest, lake, etc.) when you were a child?	Once a week ( ) Once every two weeks ( ) Once a month ( ) Whenever possible ( ) Other than these ( )
How often do you go to natural environments (forest, lake, etc.)?	Once a week ( ) Once every two weeks ( ) Once a month ( ) Whenever possible ( ) Other than these ( )
Where did you prefer to spend time outside when you were a child?	Park ( ) Garden of the House ( ) Natural area (forest etc.) ( ) Vacant land in the neighborhood ( ) Apart from these ( )
Where do you prefer to spend time outside?	Park( ) House Garden( ) Natural Area (forest etc.)( ) Shopping Mall( ) Other than these( )

2.3. Data analysis

In testing the sub-problems established in accordance with the purpose of the research, due to the normal distribution of the data, parametric techniques were used: Pearson Correlation Analysis for examining the relationship between variables; independent samples *t*-test for determining the difference between scale scores based on demographic characteristics; and One-Way Analysis of Variance (ANOVA) for more than two groups.

The choice of technique is determined by examining the distribution of the data. If the data shows a normal distribution, a *t*-test is used for binary groups, and ANOVA is used for more than two groups to examine the differences among the groups. If significant differences are detected through ANOVA, the Scheffé test is employed as a post hoc analysis to determine which specific groups differ from each other. If the data does not show a normal distribution (left-skewed or right-skewed), the Mann-Whitney U Test is applied for binary groups, and the Kruskal-Wallis H Test is used for three or more groups [30].

The research problem is as follows: "What is the role of attitudes towards the environment, environmentally friendly behaviors, and knowledge about the environment and environmental issues in determining the environmental consciousness levels of teachers and administrators?"

3. Results

3.1. Demographic characteristics of the participants

Of the 783 individuals participating in this research, 53.26% are female and 46.74% are male. It was determined that the majority of participants are in the age range of 26-30 years (44.57%); 89.02% are bachelor's degree holders and 10.98% are master's degree holders; the majority have 0-5 years of professional experience (55.48%); 87.87% are teachers, and 12.13% are administrators.

3.2. Results on participants' opinions related to the environment (yes and no options)

Participants were asked four questions related to the environment, with "Yes" and "No" options. The responses marked with high values (%) from the given options are indicated (Table 3).

Table 3. Participants' opinions on the environment: yes and no questions

Questions Regarding Participants' Opinions About the Environment	Yes (%)	No (%)
Have you received any education related to the environment?	40.36	**59.64**
Are you a member of any non-governmental organization focused on environmental protection?	8.05	**91.95**
Do environmental issues concern you?	**97.83**	2.17
Do you have any living beings (plants or animals) that you take care of at home?	**62.07**	37.93

When Table 3 is examined, questions were posed to assess the participants' views on environmental issues. In the first question, they were asked whether they had received education related to the environment; 40.36% of the participants responded affirmatively, while 59.64% answered negatively. When asked whether they were members of any non-governmental organization, 91.95% of the participants answered 'no' Regarding the question, 'Do environmental issues concern you?', a significant majority of the participants (97.83%) responded positively. In response to the question, 'Do you have any living beings (plants or animals) that you care for at home?', 62.07% of the participants answered 'yes,' while 37.93% answered 'no.

3.3. Findings related to participants' views on the places where they spent their childhood

Participants were asked six questions regarding the places where they spent their childhood. The responses to these questions are presented in ascending order based on percentage (%).

To the question, “What type of settlement did you live in during your childhood?” the answers were as follows: Town (3.83%), District (20.18%), Village (21.20%), Big city (22.61%), and Small city (32.18%).

To the question, “What type of settlement do you currently live in?” the answers were: Village (3.32%), Big city (6.51%), District (11.88%), and Small city (78.29%).

To the question, “How often did you go to natural environments (forest, lake, etc.) during your childhood?” the responses were: Every two weeks (6.26%), Other than these (9.32%), Once a month (15.96%), Once a week (24.78%), and As often as possible (43.68%).

To the question, “How often do you go to natural environments (forest, lake, etc.) now?” the responses were: Other than these (5.36%), Every two weeks (7.66%), Once a month (19.16%), Once a week (20.56%), and As often as possible (47.25%).

To the question, “Where did you prefer to spend time outdoors as a child?” the responses were: Other than these (4.98%), Park (13.67%), Vacant land in the neighborhood (25.54%), Natural area (forest, etc.) (26.05%), and The garden of the house (29.76%).

To the question, “Where do you prefer to spend time outdoors now?” the responses were: Shopping center (4.73%), Park (11.37%), Other than these (11.62%), The garden of the house (14.56%), and Natural area (forest, etc.) (57.73%).

The responses of the participants to the 5-point Likert-type questions are presented in Table 4-5. The most preferred option is marked among the relevant choices.

Table 4. 5-point Likert-type questions asked to participants about environmental attitudes

Questions	Strongly Disagree (%)	Disagree (%)	Slightly Agree (%)	Agree (%)	Strongly Agree (%)
I would like to learn about how to keep seas, lakes, and rivers clean.	0.60	2.60	6.50	36.30	**54.00**
I have no intention of doing anything to keep the seas, lakes, and rivers clean.	2.60	3.80	3.60	20.30	**69.70**
I can also do something to prevent further degradation of nature.	1.80	2.00	3.80	30.70	**61.70**
Even an individual can do something to keep the air clean.	0.80	1.40	4.60	23.90	**69.30**
I would like to volunteer and contribute to the cleaning of a polluted area (lake, river, forest and sea).	1.10	4.70	14.40	**42.10**	37.50

When Table 4 is examined, 54% of the participants responded 'strongly agree' to the question, 'I would like to learn how to keep seas, lakes, and rivers clean.' Similarly, 69.70% of the participants answered 'strongly agree' to the question, 'I have no intention of doing anything to keep the seas, lakes, and rivers clean.' Regarding the question, 'I can do something to prevent further degradation of nature,' a significant majority of the participants (61.70%) responded 'strongly agree.' It was determined that a large majority of the participants (69.30%) answered 'strongly agree' to the question, 'One individual can do something to keep the air clean.' Lastly, in response to the question, 'I would like to work voluntarily and contribute to the cleaning of a polluted area,' a significant majority of the participants (42.10%) answered 'agree.

When Table 5 is examined, it was found that a significant majority of the participants (34.40%) responded "never" to the question, "I throw used batteries in the regular trash bin." Regarding the question, "I throw used bottles in the bottle bank," the highest percentage of participants (30.90%) answered "occasionally." For the question, "I prefer to buy plastic files for school," the largest group of participants (34.20%) also responded "occasionally." In response to the question, "We are very diligent about saving energy at home or in my workplace," the majority of participants (53.80%) answered "very often." When asked, "Do you have conversations with friends about environmental pollution?", the highest percentage of participants (30.40%) indicated "occasionally." To the question, "How often do you attend a conference or meeting focused on environmental protection?", the most common response among participants (32.40%) was "quite a few." When asked, "Have you ever written a letter to a newspaper, journalist, or an authority regarding the prevention of environmental pollution?", a significant majority of participants (68.70%) responded "never." Regarding the statement, "Recycling refers to the recovery of certain wastes," the largest percentage of participants (33.30%) answered "very often." In response to the question, "It is very important for environmental protection to purchase recyclable paper," 61.90% of participants indicated "very often." Finally, for the question, "Waste should be collected separately as glass, plastic, paper, special waste, and other waste," a significant portion of participants (66.40%) responded "very often.

Table 5. 5-point Likert-type questions asked to participants about environmental behavior

Questions	Never (%)	Quite Few (%)	Occasionally (%)	Frequently (%)	Very Often (%)
I throw used batteries in normal trash bins.	**34.40**	21.70	17.80	14.00	12.10
I throw used bottles into bottle bins.	7.20	16.90	**30.90**	27.10	18.00
When purchasing files that I will use at school, I prefer plastic ones.	6.30	15.10	**34.20**	27.70	16.70
We are very meticulous about saving energy at home or in the institution where we work.	1.70	2.90	13.90	27.70	**53.80**
We chat with friends about environmental pollution.	3.70	12.80	**30.40**	25.40	27.70
How often have you attended conferences or any meetings on environmental protection?	18.80	**32.40**	31.80	10.70	6.30
Have you ever written a letter to a newspaper or journalist, politician or anyone in authority to prevent environmental pollution?	**68.70**	9.80	7.30	7.20	7.00
Recycling means recycling of some wastes.	3.40	7.00	29.60	26.60	**33.30**
When buying paper, it is very important for the environment to buy recyclable ones.	0.90	3.60	6.50	27.10	**61.90**
Garbage should be collected separately as glass, plastic, paper and special garbage.	0.60	3.20	9.20	20.60	**66.40**

3.4. Distribution of data and descriptive results

In this section of the research, the findings related to the descriptive results of the research and the distribution of the data obtained from the research are presented (Tables 6-7, Figure 1).

Table 6. Distribution of the data

	Central Tendency Measures		Kurtosis–Skewness	
Variables	$\bar{x}$	**Median**	**Kurtosis**	**Skewness**
Attitude	4.10	4.15	-0.737	0.701
Behavior	3.39	3.35	0.403	0.736
Knowledge	3.93	4.00	-0.503	-0.283
Environmental Consciousness	3.81	3.83	-0.384	0.137

The normal distribution test results for the environmental consciousness scale are as follows: The Kolmogorov-Smirnov test show $p<0.001$, and the Shapiro-Wilk test also had a $p<0.001$, indicating that the data do not follow a normal distribution. The skewness value was -0.384, and the kurtosis value was 0.137, suggesting a slight negative skewness and a near-normal peak distribution.

When the data were examined, it was found that the Kolmogorov-Smirnov *p*-value and Shapiro-Wilk *p*-value were both less than 0.05 ($p<0.001$), indicating that the data did not follow a normal distribution. However, as a result of the normality analysis, it was determined that the obtained data came from a normal distribution due to the closeness of the mean and median of the central tendency measures examined, as well as the kurtosis and skewness being within ±2 [31]. Additionally, when the histogram was examined, it was observed to show a normal distribution (Figure 2).

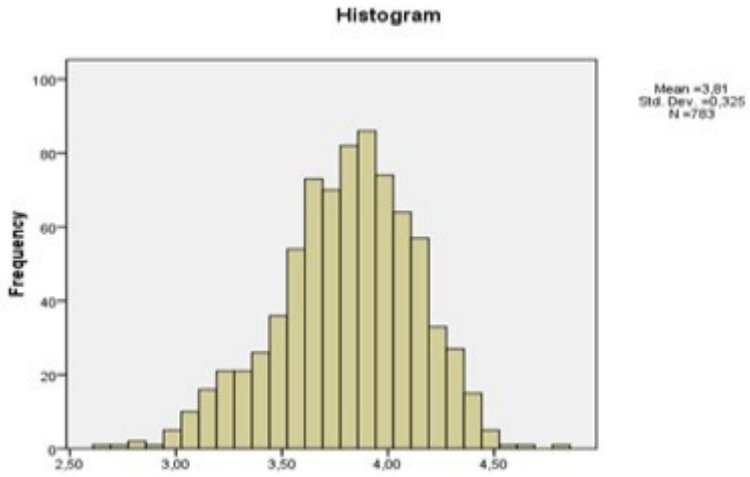


Figure 2. Histogram of the total score for environmental consciousness

It was determined that the participants' level of environmental consciousness was high, with a score of 3.81±0.33. When examining the sub-dimensions of environmental consciousness, it was found that the level of environmental consciousness attitude was high at 4.10±0.42, the level of behavioral consciousness was at a medium level of 3.39±0.46, and the level of knowledge was high at 3.93±0.49 (Table 7). In the calculation of the participants' response levels based on the obtained scores in Likert-format scales, a 0.8 point range (4/5=0.80) was used. In this case, the range corresponding to each measurement level is calculated by adding a 0.8 point range to the initial score of 1. Therefore, the ranges are as follows: 1-1.80 represents 'very low,' 1.81-2.60 represents 'low,' 2.61-3.40 represents 'medium,' 3.41-4.20 represents 'high,' and 4.21-5.0 represents 'very high' levels. If the total score of the scale is calculated, these ranges should be multiplied by the number of items [32].

Table 7. Descriptive findings related to the level of environmental consciousness

Variables	**Average**	**S.D.**
Attitude	4.10	0.42
Behavior	3.39	0.46
Knowledge	3.93	0.49
Environmental Consciousness	3.81	0.33

3.5. Results related to sub-problems

In this section of the research, analysis results related to the sub-problems established in accordance with the purpose of the study are presented. In the study, significant results

(p<0.05) were identified for five out of the sixteen sub-problems used, which are presented below.

The findings related to the question, "Is there a significant relationship between participants' knowledge, attitudes, and behaviors towards the environment?" regarding the relationship between attitude, behavior, and knowledge are provided in Table 8.

Table 8. Pearson correlation results between attitude, behavior, and knowledge

Variables		Attitude	Behavior	Knowledge
Attitude	*r*	1	0.268	0.430
	p		0.001**	0.001**
Behavior	*r*		1	0.108
	p			0.002**
Knowledge	*r*			1
	p			

**p<0.01; Pearson Correlation

According to [33], Pearson correlation coefficients between 0.1 and 0.3 are considered low, between 0.3 and 0.5 are moderate, and above 0.5 are considered high-level correlations. In line with this, when the results of the correlation analysis in Table 8 are examined, it was found that there is a positive low-level significant relationship between participants' attitude levels and behavior levels (r=0.268; p<0.01). This result indicates that when the participants' attitude levels are improved, there will be a low-level increase in their behavior levels. It was also determined that there is a positively moderate-level significant relationship between the participants' attitude levels and knowledge levels (r=0.430; p<0.01), suggesting that when the participants' attitude levels are improved, there will be a moderate-level increase in their knowledge levels. Furthermore, a positively low-level significant relationship was found between the participants' behavior levels and knowledge levels (r=0.108; p<0.01), indicating that when the participants' behavior levels are improved, there will be a low-level increase in their knowledge levels.

The findings related to the question, "Does the participants' status of receiving any environmental education lead to differences in their knowledge, attitudes, behaviors, and consciousness towards the environment?" are presented in Table 9.

Table 9. Comparison of their status of receiving education related to the environment with environmental consciousness and its sub-dimensions

Environmental Consciousness	Receiving Education Related to the Environment	n	Average	S.D.	*t*	*p*
Attitude	Yes	316	4.13	0.42	1.445	0.149
	No	467	4.09	0.41		
Behavior	Yes	316	3.46	0.44	3.580	0.001**
	No	467	3.34	0.47		
Knowledge	Yes	316	3.95	0.51	0.809	0.419
	No	467	3.92	0.48		
Environmental Consciousness	Yes	316	3.85	0.34	2.712	0.007**
	No	467	3.78	0.32		

**p<0.01; t: Independent Samples t-Test

To determine whether there is a significant difference between the environmental consciousness levels of individuals participating in the study and their status of receiving environmental education, an independent samples *t*-test analysis was studied. As a result of this analysis, a significant differentiation was found between the status of receiving environmental education and environmental consciousness (*t*:2.712; $p<0.001$) as well as the behavioral dimension of environmental consciousness (*t*:3.580; $p<0.001$). When examining the means, it was determined that individuals who received any environmental education had higher levels of environmental consciousness and behavior compared to those who did not receive such education. On the other hand, there was no differentiation in attitude and knowledge levels based on the status of receiving environmental education ($p>0.05$).

The findings related to the question, "Does the participants' perception that environmental issues concern them lead to differences in their knowledge, attitudes, behaviors, and consciousness towards the environment?" are presented in Table 10.

Table 10. Comparison of their concern about environmental issues with environmental consciousness and its sub-dimensions

Environmental Consciousness	Do Environmental Issues Concern You?	n	Average	S.D.	*t*	*p*
Attitude	Yes	766	4.11	0.41	3.014	0.003**
	No	17	3.67	0.65		
Behavior	Yes	766	3.39	0.46	1.894	0.059
	No	17	3.31	0.57		
Knowledge	Yes	766	3.93	0.49	2.582	0.011*
	No	17	3.64	0.51		
Environmental Consciousness	Yes	766	3.81	0.32	3.514	0.001**
	No	17	3.54	0.40		

**$p<0.01$; *$p<0.05$; *t*: Independent Samples *t*-Test

To determine whether there is a significant difference between the environmental consciousness levels of individuals participating in the study and their interest in environmental issues, an independent samples *t*-test analysis was studied. As a result of this analysis, a significant differentiation was found between the interest in environmental issues and environmental consciousness (*t*:3.514; $p<0.001$), the attitude dimension of environmental consciousness (*t*:3.014; $p<0.001$), and the knowledge dimension of environmental consciousness (*t*:2.582; $p<0.001$). When examining the means, it was determined that individuals interested in environmental issues had higher levels of environmental consciousness, attitude, and behavior compared to those who were not interested in such issues. On the other hand, there was no differentiation in behavior levels based on interest in environmental issues ($p>0.05$).

The findings related to the question, "Does the place where participants spent their childhood lead to differences in their knowledge, attitudes, behaviors, and consciousness towards the environment?" are presented in Table 11.

Table 11. Comparison of the places where they spent their childhood with environmental consciousness and its sub-dimensions

Environmental Consciousness	Place Where They Spent Their Childhood	n	Average	S.D.	*F*	*p*	Scheffe
Attitude	Village (a)	166	4.18	0.39	5.508	0.001**	**a>b,d**
	Town (b)	30	3.88	0.57			
	District (c)	158	4.10	0.43			
	Small city (d)	252	4.05	0.41			
	Big city (e)	177	4.15	0.40			
Behavior	Village	166	3.39	0.49	1.185	0.316	
	Town	30	3.39	0.45			
	District	158	3.45	0.46			
	Small city	252	3.35	0.46			
	Big city	177	3.40	0.43			
Knowledge	Village (a)	166	3.98	0.51	3.911	0.004**	**a>b**
	Town (b)	30	3.61	0.52			
	District (c)	158	3.92	0.51			
	Small city (d)	252	3.91	0.47			
	Big city (e)	177	3.96	0.45			
Environmental Consciousness	Village (a)	166	3.85	0.33	4.491	0.001**	**a>b**
	Town (b)	30	3.63	0.38			
	District (c)	158	3.82	0.32			
	Small city (d)	252	3.77	0.33			
	Big city (e)	177	3.84	0.29			

**$p<0.01$; *F*: One-Way ANOVA Analysis

To determine whether there is a significant difference between the environmental consciousness levels of individuals participating in the study and the places where they spent their childhood, a one-way ANOVA analysis was studied. As a result of this analysis, a significant differentiation was found between the places where participants spent their childhood and their environmental consciousness (F:4.491; $p<0.001$), attitude (F:5.508; $p<0.001$), and Knowledge (F:3.911; $p<0.001$) levels. To examine which groups contributed to the differentiation, the Scheffé test was studied. The results showed that the differences were between those who spent their childhood in villages and those in towns, as well as for the attitude dimension between those who spent their childhood in villages and those in towns and small cities. It was determined that individuals who spent their childhood in villages had higher levels of environmental consciousness and knowledge compared to those who spent it in towns, and those who spent their childhood in villages also had higher attitude levels than those in towns and small cities.

The findings related to the question, "Does the place where participants prefer to spend time outdoors lead to differences in their knowledge, attitudes, behaviors, and consciousness towards the environment?" are presented in Table 12.

Table 12. Comparison of the places they prefer to spend time outdoors with environmental consciousness and its sub-dimensions

Environmental Consciousness	Preferred Place to Spend Time Outdoors	n	Average	S.D.	*F*	*p*	Scheffe
Attitude	Park (a)	89	4.06	0.38	4.267	0.002**	**c>d**
	Garden of the house (b)	114	4.06	0.43			
	Natural area (c)	452	4.15	0.39			
	Shopping center (d)	37	3.94	0.45			
	Apart from these (e)	91	4.03	0.50			
Behavior	Park	89	3.37	0.45	2.514	0.040*	**b,c>d**
	Garden of the house	114	3.42	0.49			
	Natural area	452	3.42	0.46			
	Shopping center	37	3.24	0.43			
	Apart from these	91	3.30	0.39			
Knowledge	Park	89	3.90	0.50	0.704	0.590	
	Garden of the house	114	3.88	0.47			
	Natural area	452	3.95	0.50			
	Shopping center	37	3.91	0.46			
	Apart from these	91	3.90	0.45			
Environmental Consciousness	Park	89	3.78	0.32	3.537	0.007**	**c>d**
	Garden of the house	114	3.79	0.31			
	Natural area	452	3.84	0.32			
	Shopping center	37	3.70	0.33			
	Apart from these	91	3.74	0.35			

***p*<0.01; **p*<0.05; *F*: One-Way ANOVA Analysis

To determine whether there is a significant difference between the environmental consciousness levels of individuals participating in the study and the places they prefer to spend time outdoors, a one-way ANOVA analysis was studied. As a result of this analysis, a significant differentiation was found between the preferred outdoor places and environmental consciousness (*F*:3.537; *p*<0.001), attitude (*F*:4.267; *p*<0.001), and behavior (*F*:2.514; *p*<0.001) levels. To examine which groups contributed to the differentiation, the Scheffé test was studied. The results showed that the differences were between those who preferred to spend time in shopping centers and those who preferred natural areas, as well as for the behavior dimension between those preferring shopping centers and those spending time in their gardens and natural areas. It was determined that individuals spending time in natural areas had higher levels of environmental consciousness and attitude compared to those in shopping centers, and those spending time in their gardens and natural areas had higher behavior levels than those spending time in shopping centers.

When examining the correlations between knowledge, behavior, and attitude, it was observed that the relationship between knowledge and behavior, as well as between behavior and attitude, was low, while the relationship between knowledge and attitude was moderate. The Pearson correlation values were found to be: 0.108 between knowledge and behavior, 0.268 between behavior and attitude, and 0.430 between knowledge and attitude.

Table 13. The explanatory effect of teachers' and administrators' attitudes and knowledge on environmentally friendly behaviors

	r	R^2	*p*
Knowledge > Behavior	.108 (.001)	.012	.002
Attitude > Behavior	.268 (.000)	.072	.002
Knowledge+Attitude > Behavior		.072	.002

When examining the factors that constitute the environmental consciousness of teachers and administrators in Bitlis province, it is observed that their attitudes towards the environment and environmental knowledge do not sufficiently explain environmentally friendly behaviors (R^2=7%). This indicates that attitudes towards the environment and environmental knowledge are not very effective in the emergence of behaviors (Table 13).

4. Discussion

In this study, when examining the factors that constitute the environmental consciousness of teachers and administrators, it is observed that their attitudes towards the environment and environmental knowledge do not sufficiently explain environmentally friendly behaviors (R^2=7%). This indicates that attitudes towards the environment and environmental knowledge are not very effective in the emergence of behaviors.

In this study, the Cronbach α reliability value of the scale used was determined as α=.82. This value was found as α=.97 for the part applied in Turkey and α=.84 for the part applied in Azerbaijan in the study studied by [29]. In the study studied by [34], α=.81 was found; in the study titled Relationship between reflective thinking tendencies and environmental awareness of classroom teachers by [35], α=.73 was found at the knowledge level and α=.80 at the behavior level.

The correlation results show that there is a low positive significant relationship between the participants' attitude levels and behavior levels; there is a moderate positive significant relationship between the participants' attitude levels and knowledge levels; and a low positive significant relationship between the participants' behavior levels and knowledge levels. In a study studied by [29], it was found that there is a moderate correlation between the attitudes, knowledge, and behaviors of Turkish and Azerbaijani students.

Numerous studies have been studied on the impact of general attitudes on environmentally beneficial behaviors. However, many empirical studies have shown that the statistical relationship between general attitudes and behaviors is very low [35]. The study also found that there was no significant difference between the participants' environmental consciousness levels and their gender, age, education levels, professional experiences, roles at school, membership status in NGOs, levels of environmental education received, current places of residence, frequency of visiting natural areas during childhood, and places they spent time outdoors as children (p>0.05). Similar findings were observed in a study studied by [36]. In another study by [37], it was found that the average scores of reflective thinking scale significantly varied based on membership in environmental organizations.

In a study [38], a significant difference was found in psychomotor and overall scores while no significant difference was found in cognitive and affective levels. It was expressed that graduate degree holders tend to perform better than undergraduate degree holders. This situation was similarly observed by [12]. It was determined that participants' perceptions of environmental consciousness did not show differences in social activity and collaboration, application and modeling, association with daily life, attitudes and consciousness, and overall environmental consciousness according to their educational status. According to the findings, it can be said that participants' perceptions of

environmental consciousness did not differ in all dimensions and, on the contrary, showed similarities.

In [38] study, it was reported that those who worked for 11 years or more had a higher level of environmental consciousness compared to those who worked for 6-10 years. The findings related to environmental education were found to parallel those of [39] and [40]. In this study, it was determined that there is no significant relationship between the ages of the participants and their levels of environmental consciousness (p>0.05). A similar situation was observed in the research results studied by [39] and [41]. However, in [39] findings, it was stated that age differences were statistically significant in their views on the environment.

In response to the question "I would like to see the knowledge on how to keep seas, lakes, and rivers clean," the majority of participants responded positively (strongly agree, 54.00%). A similar result was also found in [42] study. Additionally, regarding the question "I have no intention of doing anything to keep seas, lakes, and rivers clean," a response of strongly agree (69.70%) was noted. This question was answered in parallel with 72.1% in [42] study. In response to the question "I can do something to prevent further degradation of nature," 61.70% of participants responded with strongly agree, which similarly aligned with 50.7% in [42] study.

Based on these findings, a contradiction has emerged in the responses of teachers and administrators. This situation indicates that while teachers and administrators possess knowledge and attitudes regarding the environment, they seem to face challenges in translating these into behavior.

In this study, a significant difference was found between the participants' levels of environmental consciousness and the places they spent their childhood (p>0.05). The Scheffé Test revealed that the differences originated between those who spent their childhood in villages and those in towns, and for the attitude dimension between those in villages and those in towns and small cities. It was determined that individuals who spent their childhood in villages had higher levels of environmental consciousness and knowledge compared to those in towns. Furthermore, those who grew up in villages also had higher attitude levels than those in towns and small cities. Similarly, in a study studied by [43] on the environmental friendly behaviors of preschool teachers, it was found that teachers who grew up in small cities had higher attitudes towards the environment compared to those from large cities.

In this study, individuals who received any environmental education had higher levels of environmental consciousness and behavior compared to those who did not receive environmental education. However, there was no significant difference in attitude and knowledge levels based on the status of receiving environmental education. In another study [44], it was found that the scores from the environmental consciousness sub-dimension significantly differed based on whether they took an environmental course, with the difference being in favor of those who took the course. Other studies evaluating the environmental consciousness levels of physics, chemistry, and biology teacher candidates highlight that environmental education is not sufficiently emphasized in educational institutions in our country. Considering all items in the survey, it was concluded that knowledge and attitudes towards the environment did not differ based on

gender and branch. Another finding was that teacher candidates' knowledge and behaviors towards the environment were not at a sufficient level [10].

In this research, regarding the question "Does the current place of residence of participants cause differences in their knowledge, attitudes, behaviors, and consciousness towards the environment?" no significant difference was found between the current place of residence and the participants' environmental consciousness and its sub-factors. In the study by [44] it was also found that the scores from the environmental sensitivity and environmental consciousness sub-dimensions did not show significant differences based on the place of residence.

In this study, it was observed that the majority of participants (69.30%) responded with strongly agree to the question "Can an individual do something to keep the air clean?" Similarly, in a study studied by [42], the majority (67.9%) also responded with strongly agree. The data indicate that participants have a positive attitude and consciousness regarding air pollution and its solutions. Regarding the question "I would like to volunteer and contribute to the cleaning of a polluted area," 42.10% responded with agree, which parallels [42] study where 49.6% agreed. Based on these results, it can be inferred that participants are willing to contribute to cleaning efforts for polluted areas, indicating their sensitivity to pollution in their environment.

In this study, a portion of the participants responded that they sometimes discuss environmental pollution with friends (30.40%), indicating their consciousness of the pollution issue. When asked how often they attend conferences or meetings related to environmental protection, 32.40% responded very rarely. Furthermore, 33.30% stated that they completely agree with the statement "Recycling means reusing certain wastes," showing their consciousness of recycling. Additionally, 61.90% completely agreed that "It is very important to buy recyclable paper for environmental protection," and 66.40% completely agreed that "Waste should be collected separately as glass, plastic, paper, special waste, and other waste." This indicates that teachers and administrators in this study are aware of the need for separate waste collection and the importance of recycling.

Moreover, when asked if they throw used bottles into bottle banks, 30.90% said sometimes, and when asked if they prefer plastic files for school, 34.20% responded sometimes. Regarding the question of whether they throw used batteries into regular trash bins, 34.40% said never, suggesting that participants likely dispose of old batteries in battery collection boxes. Additionally, 53.80% frequently stated that they are very careful about energy conservation at home or in their workplace. It appears that teachers in Bitlis province do not have low attitudes towards environmental consciousness, environmental knowledge, and solutions to environmental problems. They express concern about environmental issues and are dissatisfied with the current situation. It has been identified that although teachers and administrators have knowledge and attitudes regarding the environment, there are deficiencies in translating this Knowledge and attitude into behavior.

Finally, the study found that the environmental attitudes and knowledge of teachers and administrators do not sufficiently explain environmentally friendly behaviors (R^2=7%). This suggests that attitudes towards the environment and environmental Knowledge are not very effective in the emergence of behaviors. The correlation analysis results indicate that there is a low positive significant relationship between attitude levels and behavior

levels, a moderate positive significant relationship between attitude levels and knowledge levels, and a low positive significant relationship between behavior levels and knowledge levels. In a study studied by [29], it was found that Turkish students exhibited a moderate correlation between their attitudes, knowledge, and behaviors.

Implications

In this study, the larger number of participants compared to similar studies makes the research significant. As is well known, acquiring knowledge about the environment is a lifelong endeavor. This research indicates that teachers and administrators in the province of Bitlis are sensitive to environmental issues, but they do not actively reflect this awareness in their efforts to protect the environment. In the literature, it has been noted that a primary reason for the generally low level of environmental awareness is the lack of environmental education curricula in schools. Furthermore, fundamental environmental knowledge is not adequately addressed in various courses offered in the curriculum. In higher education, the universally accepted understanding of environmental education has remained weak across all universities [10, 19, 45, 46]. The ability of prospective teachers to serve as good role models for their students regarding environmental issues depends on the quality of the environmental education courses they receive during their pre-service training. Therefore, the inclusion of mandatory and elective courses related to the environment in every program will help prevent prospective teachers from constructing their environmental knowledge based on hearsay, fostering individuals with environmental knowledge and awareness [9]. If natural resources continue to be used carelessly, numerous environmental disasters will unfortunately occur, endangering human life [47]. It is recommended to conduct activities that will increase environmental awareness and attitudes; to carry out similar studies in regions with different socioeconomic conditions to enrich research findings; to conduct research with adults from various professions in institutions such as schools, universities, and hospitals; to educate the public through seminars and panels on environmental education at community education centers; to convey messages about what can be done for the environment through media; to encourage everyone to use environmentally friendly products; to have municipalities provide recycling bins in streets, neighborhoods, and communities; and to organize nature trips by various institutions to raise environmental awareness.

Limitations

This research was studied on a voluntary basis with teachers and administrators working in various official educational institutions (kindergarten, primary school, secondary school, and high school) located in the central district of Bitlis Provincial Directorate of National Education during the spring semester of the 2021-2022 academic year. The forms related to the research were implemented starting from June 6, 2022, with the approval of the provincial governor’s decree dated May 27, 2022, and the consent of the provincial directorate of national education. As of the year the research was studied, there are 142 schools and 1,287 teachers and administrators in the central district of Bitlis. In this context, the sample of the research consisted of 783 volunteer teachers and administrators.

References

[1] Erten, S., 5. sınıf öğrencilerinde" çöplerin azaltılması" bilincinin kazandırılmasına yönelik bir öğretim modeli, **Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, 25, 94-103, (2003).

[2] Çiftçi, S. ve Kayaer, M., Yükseköğretimde çevre eğitiminin çevre bilincine etkisi, **Yönetim ve Ekonomi Dergisi**, 29, 1, 93-106, (2022).

[3] Gürcüoğlu, S., Türkiye'de çevre eğitiminde kamu örgütleri, sivil toplum örgütleri ve medyanın rolü, **Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi**, 15, 3, 151-170, (2013).

[4] Erten, S., Okul öncesi öğretmen adaylarında çevre dostu davranışların araştırılması, **Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, 28, 28, 91-100, (2005).

[5] Erten, S., Enerji tasarrufu davranışında ortaya çıkabilecek psikolojik ve sosyolojik engeller, **25. Enerji Verimliliği Konferansı***,* 23-34, (2006).

[6] Zsóka, Á., Szerényi, Z. M., Széchy, A. ve Kocsis, T., Greening due to environmental education? Environmental knowledge, attitudes, consumer behavior and everyday pro-environmental activities of Hungarian high school and university students, **Journal of Cleaner Production**, 48, 126-138, (2013).

[7] Liefländer, A. K., Fröhlich, G., Bogner, F. X. ve Schultz, P. W., Promoting connectedness with nature through environmental education, **Environmental Education Research**, 19, 3, 370-384, (2013).

[8] Otto, S. ve Pensini, P., Nature-based environmental education of children: Environmental knowledge and connectedness to nature, together, are related to ecological behaviour, **Global Environmental Change**, 47, 88-94, (2017).

[9] Demirkaya, H., Çevre eğitiminin Türkiye'deki coğrafya programları içerisindeki yeri ve çevre eğitimine yönelik yeni yaklaşımlar, **Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi**, 16, 1, 207-222, (2006).

[10] Demircioğlu, G., Demircioğlu, H. ve Yadigaroğlu, M., Fizik, kimya ve biyoloji öğretmen adaylarının çevre bilinç düzeylerinin değerlendirilmesi, **Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, 19, 167-193, (2015).

[11] McKeown-Ice, R., Environmental education in the United States: A survey of preservice teacher education programs, **The Journal of Environmental Education**, 32, 1, 4-11, (2000).

[12] Çakır, Ö., Fen bilimleri ve sosyal bilgiler öğretmenlerinin çevre bilinci algıları, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli (2023).

[13] Uzun, B. ve İris, H., Fen bilimleri öğretmen adaylarının çevre ve çevre sorunlarına yönelik algılarının kelime ilişkilendirme testi aracılığıyla belirlenmesi, **Social Science Development Journal**, 8, 40, 105-125, (2023).

[14] Gürer, B. ve Mermer, K. K., Çevre bilinci, çevresel duyarlılık ve doğaya bağlılık: öğretmenler üzerine bir inceleme, **Spor ve Performans Araştırmaları Dergisi**, 14, 3, 349-366, (2023).

[15] Eyiol, S., Çövüt, O., Mergensoy, D., Kırğıl, A., Bacak, E. ve Karadeniz, V., Öğretmenlerin Çevre Duyarlık Algıları, **Premium e-Journal of Social Science (PEJOSS)**, 8, 38, 209-225, (2024).

[16] Şaşkın, F. ve İzgı-onbasılı, U., Sınıf öğretmenlerinin doğayla ilişki ve çevre bilinç düzeyleri arasındaki ilişkinin incelenmesi, **Uluslararası Temel Eğitim Çalışmaları Dergisi**, 4, 3, 99-117, (2023).

[17] Sakçı, G. ve Uyanık, G., Sınıf öğretmenlerinin çevre sorunlarına ilişkin tutumlarının ve çevresel duyarlılıklarının incelenmesi, **International Journal of**

Eurasia Social Sciences/Uluslararasi Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi, 14, 53, 1170-1193, (2023).

[18] Karacaoğlu, Ö. C. ve Karacaoğlu, D., Fizik öğretmenlerinin çevre duyarlılıkları, **Uluslararası Eğitimde Mükemmellik Arayışı Dergisi (UEMAD)**, 3, 2, 1-19, (2023).

[19] Fidan-Yazgan, P., Ulusal fen bilimleri öğretim programları ve seçmeli çevre eğitimi programlarındaki kazanımların çevre okuryazarlığı bağlamında karşılaştırılması, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, (2023).

[20] Demir, F. B. ve Ulukaya-Öteleş, Ü., Öğretmenlerin gözüyle çevre sorunları ve çevre sorunlarına ilişkin çözüm önerileri, **Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, 23, 1, 379-396, (2023).

[21] Boland, H. ve Heintzman, P., **The perceived impact of a university outdoor education program on students' environmental behaviors**. In In: Watts, Clifton E., Jr.; Fisher, Cherie LeBlanc, eds. Proceedings of the 2009 Northeastern Recreation Research Symposium. Gen. Tech. Rep. NRS-P-66. Newtown Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station: 31-35. (Vol. 66, pp. 31-35), (2010).

[22] McEwen, K. E., The primary school factors that shape the environmental knowledge, attitudes, and behaviours of children, Doctoral dissertation, University of Waikato, (2015).

[23] Hashemzadeh, F., Environmental awareness, attitudes, and behaviour of secondary school students and teachers in Tehran, Doctoral dissertation, University of Waikato, İran, (2016).

[24] Pan, S. L., Chou, J., Morrison, A. M., Huang, W. S. ve Lin, M. C., Will the future be greener? The environmental behavioral intentions of üniversity tourism students. **Sustainability**, 10, 3, 634, (2018).

[25] Al-Qadasi, E., Outdoor encounters in nature as a promoter for environmental consciousness of primary school students from their teachers' perspectives, Master Thesis, Linköping University, (2022).

[26] Alkan, A., Bitlis şehrinin çevre sorunlari ve alinmasi gereken önlemler, **Doğu Coğrafya Dergisi**, 20, 33, 11-36, (2015).

[27] Büyüköztürk, Ş., Çakmak-Kılıç, E., Akgün, Ö. E., Karadeniz, Ş. ve Demirel, F., **Bilimsel araştırma yöntemleri,** Pegem Yayıncılık (2014).

[28] Schrenk, M., **Umwelterziehung an der Förderschule.** Kiel. IPN. (1994).

[29] Erten, S., Türk ve Azeri öğretmen adaylarında çevre bilinci, **Eğitim ve Bilim**, 37, 166, 88-100, (2012).

[30] Kilmen, S., **Eğitim araştırmacıları için SPSS uygulamalı istatistik (4. Baskı)**, Anı Yayıncılık, (2022).

[31] George, D. ve Mallery, M., **SPSS for windows step by step: a simple guide and reference,** 17.0 update (10a ed.). Boston: Pearson.(2010).

[32] Göncü, F. M. (2023). Etkileşimli okuma faaliyetinin, dil ve konuşma bozukluğu olan veya olmayan okul öncesi çocuklarının iletişim becerilerine olan etkisinde ebeveyn uygulama ve görüşlerinin belirlenmesi [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Kapadokya Üniversitesi.

[33] Harris, P. T., & Brown, P. J. (2010). "Pearson's correlation coefficient and its interpretation in research." Journal of Research in Education 12(2), 34-46.

[34] Kahyaoğlu, M., & Özgen, N., Öğretmen adaylarının çevre sorunlarına yönelik tutumlarının çeşitli değişkenler açısından incelenmesi, **Journal of Theoretical Educational Science,** 173, (2012).

[35] Şener, A. ve Yoldaş, C., Sınıf öğretmenlerinin yansıtıcı düşünme eğilimleri ve çevre bilinci arasındaki ilişki, **Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi**, 5, 10, 125-139, (2020).

[36] Erten, S., Planlanmış davranış teorisi ile uygulamalı öğretim metodu, **Hacettepe Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi**, 19, 2, 217-233, (2002).

[37] Karaismailoğlu, E. S., Öğretmenlerin çevre bilinci düzeyinin belirlenmesi-Ankara Etimesgut örneği, Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, (2018).

[38] Sümmen, A., Sınıf öğretmen adaylarının yansıtıcı düşünme eğilimleri ile tüketici çevre bilinci düzeyleri arasındaki ilişki, Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, (2022).

[39] Baş, O., Ortaöğretim kurumlarında çevre bilincinin yöneticiler ve öğretmenler tarafında algılanma ve benimsenme düzeyi, Yüksek lisans tezi, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, (2011).

[40] Erol, G. H., Sınıf öğretmenliği ikinci sınıf öğrencilerinin çevre ve çevre sorunlarına yönelik tutumları, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, (2005).

[41] Karataş, A., Çevre bilincinin geliştirilmesinde çevre eğitiminin rolü ve Niğde Üniversitesi eğitim fakültesi örneği, Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, (2013).

[42] Kaya-Durna, D., İlköğretim okullarında görev yapan sınıf öğretmenlerinin çevre bilinci ve bu okullardaki çevre eğitimi, Yüksek lisans tezi, Amasya Üniversitesi, Amasya, (2016).

[43] Günindi, Y., Okul öncesi öğretmenlerinin çevre dostu davranışlarının araştırılması, **TÜBAV Bilim Dergisi**, 3, 3, (2010).

[44] Torun, B., Aydemir, K. ve Gül, A., Öğretmen adaylarının çevre bilinci ve çevresel duyarlılıklarının farklı değişkenlere göre incelenmesi, **Anadolu Öğretmen Dergisi**, 7, 1, 1-24, (2023).

[45] Özdemirkol, M., Çevre Bilinci Eğitiminde Muş Alparslan Üniversitesi'nin ders müfredatı üzerine bir inceleme. **Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi***,* 8(UMS'20), 181-191, (2020).

[46] Alım, M., Avrupa Birliği üyelik sürecinde Türkiye'de çevre ve ilköğretimde çevre eğitimi. **Kastamonu Education Journal**, 14(2), 599-616, (2006).

[47] Buhan, B., Okul öncesinde görev yapan öğretmenlerin çevre bilinci ve bu okullardaki çevre eğitiminin araştırılması, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, (2006).

DOI:10.25092/baunfbed. 1554641 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 464-474, (2025)*

Diophantine equations on cross-multiplicative forms of the Pell and Pell-Lucas numbers

Ahmet EMİN[1,*], Ahmet DAŞDEMİR[2]

[1]*Karabük University Faculty of Science, Department of Mathematics, Central Campus, Karabük.*
[2]*Kastamonu University, Faculty of Science, Department of Mathematics, Kuzeykent Campus, Kastamonu.*

Geliş Tarihi (Received Date): 23.09.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.02.2025

Abstract

This study aims to explore all Pell numbers that are the product of two random Pell-Lucas numbers and all Pell-Lucas numbers that are the product of two random Pell numbers based on linear forms in logarithms of algebraic numbers using Matveev's theorem and Dujella - Pethő reduction lemma. Further, we find all the common terms of Pell and Pell-Lucas numbers and show that no Pell and no Pell-Lucas numbers can be written as a square of another.

Keywords: *Pell number, Pell-Lucas number, Diophantine equation, Matveev's theorem, Dujella-Pethő reduction lemma, linear forms in logarithms.*

Pell ve Pell-Lucas sayılarının karşılıklı çarpımsal eşitlikleri ile ilgili Diophantine denklemleri

Öz

Bu çalışma, logaritmalardaki lineer formlara dayalı olarak geliştirilen Matveev's teoremi ve Dujella-Pethő indirgeme lemması kullanılarak, iki rastgele Pell-Lucas sayısının çarpımı olan tüm Pell sayıları ve iki rastgele Pell sayısının çarpımı olan tüm Pell-Lucas sayılarını araştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, Pell ve Pell-Lucas sayılarına ait ortak terimler incelenmiş ve hiçbir Pell sayısının bir Pell-Lucas sayısının karesi olamayacağı gibi, hiçbir Pell-Lucas sayısının da bir Pell sayısının karesi olarak yazılamayacağı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Pell sayısı, Pell-Lucas sayısı, Diophantine denklemler, Matveev's teoremi, Dujella-Pethö indirgeme lemması, logaritmalarda lineer formlar.*

[*]Ahmet EMİN, ahmetemin@karabuk.edu.tr, http://orcid.org/0000-0001-7791-7181
Ahmet DAŞDEMİR, ahmetdasdemir37@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-8352-2020

1. Introduction

The Pell numbers, denoted by $\{P_n\}_{n\geq 0}$, create a second-order integer sequence, which is defined by the recurrence relation $P_n = 2P_{n-1} + P_{n-2}$ for all integers $n \geq 2$ with initial conditions $P_0 = 0$ and $P_1 = 1$. Further, the Pell-Lucas numbers, denoted by $\{Q_n\}_{n\geq 0}$, can be obtained by using the same recurrence relation but with initial conditions $Q_0 = 2$ and $Q_1 = 2$. On the other hand, the mentioned sequences can be generated by Binet's formula as follows:

$$P_n = \frac{\gamma^n - \delta^n}{\gamma - \delta} \text{ and } Q_n = \gamma^n + \delta^n, \tag{1}$$

where $\gamma = 1+\sqrt{2}$ and $\delta = 1-\sqrt{2}$, which are the roots of $x^2 - 2x - 1 = 0$. It can be said that the Pell and Pell-Lucas numbers are among the most fascinating integer sequences due to their numerous applications in fields such as number theory, cryptography, and group theory. These sequences are essential in solving Diophantine equations and understanding the structure of certain algebraic objects. In recent years, their applications in cryptography and group theory have been extensively explored. Examples of studies in [1-4] can be consulted, and the fundamental reference in [5] provides more precise examples.

An investigation of Diophantine equations of various configurations consisting of integer sequences such as Fibonacci, Lucas, Pell, or Jacobsthal numbers has become very popular in recent years. In [6], Alekseyev investigated the needed conditions under which two various generalized sequences can have common terms. In [7], Bravo and Luca identified all common terms of two different generalized *k*-Fibonacci sequences. In [8], Bensella and Behloul found the Leonardo numbers that are also the Jacobsthal numbers. In [9], Chalebgwa and Ddamulira studied all the Padovan numbers in the form of palindromic combinations of two distinct repdigits in the usual base. In [10], Daşdemir and Varol examined the Jacobsthal numbers that are expressible with the product of two Modified Pell numbers. The authors of [11] studied Fibonacci and Lucas numbers that are a product of their arbitrary terms. In [12], Ddamulira et al. conducted a solution process to determine whether Fibonacci or Pell numbers can be expressed as the product of two Pell or Fibonacci numbers. One of the key contributions of this work is that it represents one of the earliest studies to investigate whether the product of terms from two well-known integer sequences equals a term from another integer sequence. Additionally, this study provides valuable guidance on how to effectively apply several important lemmas and theorems presented within. In [13], Emin investigated Pell numbers that can be expressed as the sum of two Mersenne numbers. Next, the same author studied Mersenne numbers that are expressible as the summation of two Fibonacci numbers in [14] and powers of two written as the sums of the squares of two Lucas numbers in [15]. Unlike the studies referenced earlier, these works extend the exploration to include sums in exponential forms within integer sequences, inspired by the idea of investigating whether the sum of terms from two integer sequences equals a term from another sequence. In [16], Erduvan and Keskin found all repdigits that are the products of two Fibonacci or Lucas numbers. In [17], Luca and Togbé studied all the Pell equations whose solutions are the usual Fibonacci numbers. In [18], Marques and Togbé proved that the sum of only the first

powers or square of two consecutive Fibonacci numbers can be a Fibonacci number. In [19], Chaves and Marques developed an investigation into the problem originally studied by Marques and Togbé [18] for generalized *k*-Fibonacci numbers. In [20], Sahukar and Panda searched all solutions to the Brocard-Ramanujan-type equations consisting of balancing-like and associated balancing-like numbers.

To the best of our knowledge, the Pell numbers that can be expressible in terms of the product of two random Pell-Lucas numbers or vice versa, the Pell-Lucas numbers that are the product of two random Pell numbers, have not yet been investigated. In this paper, our problems are as follows:

$$P_k = Q_m Q_n \tag{2}$$

and

$$Q_k = P_m P_n, \tag{3}$$

where $k \geq 1$ and $1 \leq m \leq n$. There is a lack of mathematical investigation to provide fundamental insights regarding the solutions to the above-mentioned Diophantine equations. Further, it is noteworthy that the integer sequences on both sides of the above equations have the same algebraic equation, i.e., $x^2 - 2x - 1 = 0$. This is a factor that beclouds the solution within the framework of the usual method in the current literature. To address the issue, we put forth a mathematical approach to investigate the problems considered herein based on the Matveev's theorem [21, p. 1219] and Dujella-Pethő reduction lemma [22, p. 303].

2. Basic tools

This section presents essential definitions, some results, and the notations used from algebraic number theory.

Let η be an algebraic number, and let

$$f(x) = t_0 \prod_{s=1}^{l} \left(x - \eta^{(s)} \right)$$

be its minimal polynomial of degree l, where $t_0 > 0$ and $\eta^{(s)}$ is the *sth* conjugate of η in $\mathbb{Z}[x]$. Furthermore, let $h(\eta)$ denotes the logarithmic height of the algebraic number η; it is given by

$$h(\eta) = l^{-1} \left(\log |t_0| + \sum_{s=1}^{l} \log \left(\max \left\{ \left| \eta^{(s)} \right|, 1 \right\} \right) \right).$$

Several properties related to logarithmic height, which can also be found in numerous references such as [12, 21- 22], are presented below:

$$h(\eta_1+\eta_2) \le h(\eta_1)+h(\eta_2)+\log 2,$$
$$h(\eta_1\eta_2^{\pm 1}) \le h(\eta_1)+h(\eta_2),$$
$$h(\eta^p)=|p|h(\eta).$$

Let η_i be an algebraic number in the real number field $\mathcal{F}$ for $i=1,2,...,l$ where the degree of $\mathcal{F}$ is *D*. Additionally, let $b_1,b_2,...,b_l$ represent nonzero rational integers. Now we will introduce the following notations:

$\Lambda := \eta_1^{b_1}\eta_2^{b_2}...\eta_l^{b_l}-1$ and $B := \max\{|b_1|,|b_2|,...,|b_l|\}$.

In the following, with the aid of the notations provided above, we will present the theorem published by Matveev in [21], which will be frequently used throughout this paper.

Theorem 2. 1 (Matveev's Theorem). Let Λ be non-zero, and let $\mathcal{F}$ be a real number field of degree *D*. Then,

$$\log(|\Lambda|) > -1.4\cdot 30^{l+3}\cdot l^{4.5}\cdot D^2\cdot(1+\log D)\cdot(1+\log B)\cdot A_1\cdot A_2\cdot ...\cdot A_l$$

where A_i are positive real numbers and satisfy $A_j \ge \max\{Dh(\eta_j),|\log\eta_j|,0.16\}$ for $j=1,2,...,l$.

To tighten the bounds when applying Theorem 2.1, the following lemma, developed by Dujella and Pethő as Lemma 5(a) in [22], is used.

Lemma 2. 2 (Dujella and Pethő). Let *M* be a positive integer, $\frac{p}{q}$ be a convergent of the continued fraction expansion of the irrational number τ such that $6M<q$, and let *A*, *B*, and μ be real numbers where A>0 and B>1. Define $\varepsilon := \|\mu q\| - M\|\tau q\|$, where $\|\cdot\|$ denotes the distance from the nearest integer. If $\varepsilon>0$, then there is no solution to the inequality

$$0<k\tau-n+\mu<AB^{-\phi}$$

where $k,\mu,$ and ϕ are positive integers with

$$k\le M \text{ and } \phi \ge \frac{\log(Aq/\varepsilon)}{\log B}.$$

3. Main results

The main result of the paper is given below:

Theorem 3. 1. Let *k*, *m*, and *n* be a non-zero integer such that $k \geq 1$ and $1 \leq m \leq n$. Then, all the solutions to Equation (2) are given only by $(k,m,n)=(4,1,2)$, and all the solutions to Equation (3) are given only by $(k,m,n)=(1,1,2)$.

Proof. Here, we will consider both target equations simultaneously but divulge details only for Equation (2).

First, one can prove the following inequalities by the induction method:

$$\gamma^{n-2} \leq P_n \leq \gamma^{n-1}, \quad \gamma^{n-1} \leq Q_n \leq 2\gamma^n, \text{ and } |\delta|^{-n+1} \leq Q_n \leq |\delta|^{-n-1}. \tag{4}$$

From (4), we can write

$$\gamma^{k-2} \leq P_k = Q_n Q_m \leq |\delta|^{-n-m-2}. \tag{5}$$

So, we get

$$(k-2)\log\gamma \leq -(n+m+2)\log|\delta| \Rightarrow k \leq 2-(n+m+2)\frac{\log|\delta|}{\log\gamma} < 4n,$$

where we used the fact that $m \leq n$ and $\frac{\log|\delta|}{\log\gamma} \cong -1$. Using Binet's formulas in Equation (1), we can write

$$\begin{aligned} P_k = Q_m Q_n \Rightarrow \frac{\gamma^k - \delta^k}{2\sqrt{2}} &= (\gamma^m + \delta^m)(\gamma^n + \delta^n) \\ \Rightarrow \gamma^k - 2\sqrt{2}\cdot\delta^{m+n} &= 2\sqrt{2}\cdot\gamma^{n+m} + 2\sqrt{2}\cdot\gamma^n\cdot(-1)^m\gamma^{-m} \\ &\quad + 2\sqrt{2}\cdot\gamma^m\cdot(-1)^n\gamma^{-n} + (-1)^k\gamma^{-k}. \end{aligned}$$

Taking the absolute value of both sides under $k < 4n$ and $m \leq n$ after dividing the last equation by γ^k, we conclude that

$$\begin{aligned} \left|1-\gamma^{-k}\cdot\delta^{n+m}\cdot 2\sqrt{2}\right| &\leq \left|2\sqrt{2}\gamma^{n+m-k} + 2\sqrt{2}\gamma^{n-m-k} + 2\sqrt{2}\gamma^{m-n-k} + \gamma^{-k}\right| \\ &\leq \left|6\sqrt{2}\gamma^{-2m} + \gamma^{-m}\right| = \left|6\sqrt{2}\cdot\frac{1}{\gamma^{2m}} + \frac{1}{\gamma^m}\right| < \frac{2}{\gamma^m} \end{aligned}$$

for $m \geq 3$. So, we have

$$|\Lambda_1| < \frac{2}{\gamma^m}, \ \Lambda_1 := \gamma^{-k}\delta^{n+m}2\sqrt{2} - 1. \tag{6}$$

We can consider the case where $l=3$, $\eta_1=\gamma$, $\eta_2=\delta$, $\eta_3=2\sqrt{2}$, $b_1=-k$, $b_2=n+m$, and $b_3=1$. Here, $\eta_1,\eta_2,\eta_3 \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})$ and $\mathcal{F}=\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ of degree $D=2$. Further, $\Lambda_1 \neq 0$

. On the contrary, let us assume that $\Lambda_1 = 0$. Then, it must be $\gamma^k \cdot \delta^{-n-m} = 2\sqrt{2}$. However, this leads to a contradiction because the square of $\gamma^k \cdot \delta^{-n-m}$ does not equal an integer, whereas the square of $2\sqrt{2}$ is an integer. Therefore, it follows that $\gamma^k \cdot \delta^{-n-m} \neq 2\sqrt{2}$.

On the other hand, to apply Matveev's the famous theorem to Equation (6), we compute the following:

$$h(\eta_1) = h(\eta_2) = \frac{1}{2}\log\gamma,\ h(\eta_3) = \frac{3}{2}\log 2,\ A_1 = A_2 = \log\gamma, \text{ and } A_3 = 3\log 2,$$

where $h(\eta_j)$ denotes the logarithmic height of η_j and A_j's are a positive real number satisfying that $A_j \geq \max\left\{Dh(\eta_j), |\log\eta_j|, 0.16\right\}$ for $j = 1,2,3.$ Further, when $B = 4n$, then $B \geq \max\{|-k|, n+m, 1\}$. In this case, according to Matveev's theorem, we can write

$$\log(|\Lambda_1|) > -1.57\times 10^{12} \times (1+\log 4n). \tag{7}$$

Also, from Inequality (6), we have

$$\log(|\Lambda_1|) < \log 2 - m\log\gamma. \tag{8}$$

From Inequalities (7) and (8), we deduce that

$$m < 1.79\times 10^{12} \times (1+\log 4n). \tag{9}$$

Now, let us return to Equation (2). Using a procedure similar to the one used to derive Inequality (6), we can obtain the following:

$$|\Lambda_2| < \frac{17}{\gamma^n},\ \Lambda_2 := \gamma^{-k}\delta^n 2\sqrt{2}Q_m - 1. \tag{10}$$

So, we can write

$$\log(|\Lambda_2|) < \log 17 - n\log\gamma. \tag{11}$$

Also, we can consider the case where $l = 3$, $\eta_1 = \gamma$, $\eta_2 = \delta$, $\eta_3 = 2\sqrt{2}Q_m$, $b_1 = -k$, $b_2 = n$, and $b_3 = 1$ this time. So, $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})$ and $\mathcal{F} = \mathbb{Q}(\sqrt{2})$ of degree $D = 2$. As can be seen, since $\gamma^k \cdot \delta^{-n} = 2\sqrt{2}Q_m$ is never satisfied, $\Lambda_2 \neq 0$. Then, we can write

$$h(\eta_1) = h(\eta_2) = \frac{1}{2}\log\gamma, \text{ and } A_1 = A_2 = \log\gamma.$$

Also, since η_3 is a root of $x^2-8Q_m^2$, we have $h(\eta_3)=\log\left(2\sqrt{2}Q_m\right)$. Further, using the fact that $h(\eta_1\eta_2)\le h(\eta_1)+h(\eta_2)$ and $Q_m\le 2\gamma^m$, we can conclude that

$$h(\eta_3)=\log\left(2\sqrt{2}Q_m\right)=\log 2\sqrt{2}+\log Q_m\le\log 2\sqrt{2}+\log 2+m\log\gamma\le 3m\log\gamma$$

for all $m\ge 1$. Therefore, we can write

$$6m\log\gamma=2\left(3m\log\gamma\right)\ge Dh(\eta_3)\ge\max\left\{Dh(\eta_3),\left|\log(\eta_3)\right|,0.16\right\}.$$

So, we have that $A_3=6m\log\gamma$. In addition, $B\ge\max\left\{\left|-k\right|,n,1\right\}$ for $B=4n$. According to Matveev's theorem, we have

$$\log(|\Lambda_2|)>-3.99\times10^{12}\times\left(1+\log 4n\right)\times m. \tag{12}$$

From Inequalities (11) and (12), we have

$$n<4.53\times10^{12}\left(1+\log(4n)\right)\times m. \tag{13}$$

By comparing Inequality (13) with Inequality (9), we obtain

$$n<3.77\times10^{28}. \tag{14}$$

By the same token, after making the same mathematical consideration for Equation (3), we can attain the following definition and results:

$$|\Lambda_3|<\frac{2}{\gamma^{2m}},\ \Lambda_3:=\gamma^{-k}\delta^{n+m}2^{-3}-1,\ k<4n,\ \ m<6.25\times10^{11}\times\left(1+\log(4n)\right),$$

$$|\Lambda_4|<\frac{3}{\gamma^{n}},\ \Lambda_4:=\gamma^{-k}\delta^{n}Q_m-1,\ n<1.6\times m\times10^{14},\ n<6.7\times10^{27}.$$

As a result, we can outline the above results as follows.

Lemma 3.2. Let the triple (k,m,n) be a solution of Equation (2) or Equation (3). Then, $k<4n$, $1\le m\le n,$ and $n<3.77\times10^{28}$.

As can be seen, we found that there are a finite number of solutions to our problems but the bounds are quite rough. To obtain a more suitable case, we will use the Dujella -Pethő reduction lemma.

First, we take a look at the notation

$$\Gamma_1:=-k\log\gamma+(n+m)\log|\delta|+\log 2\sqrt{2}. \tag{15}$$

Then, we get

$$\Lambda_1 := \left|e^{\Gamma_1} - 1\right| < \frac{2}{\gamma^m}.$$

It is clear that $|\Lambda_1| < \frac{2}{\gamma^m} < \frac{1}{2}$ for all $m \geq 2$. Additionally, we know from Ddamulira et al. [10, p. 16] that $|x| \leq 2|e^x - 1|$ whenever $x \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$. Therefore, we can write $|\Gamma_1| < 2|e^{\Gamma_1} - 1| < \frac{4}{\gamma^m}$. Considering this inequality together with (15) and dividing both sides by $\log|\delta|$, we obtain

$$\left| k\frac{\log\gamma}{\log|\delta|} - (n+m) + \frac{\log\left(1/2\sqrt{2}\right)}{\log|\delta|} \right| < \frac{5}{\gamma^m}.$$

Then, according to the Dujella-Pethő reduction lemma for $M = 1.51\times10^{29}$ $(M > 4n > k)$ and $\tau = \frac{\log\gamma}{\log|\delta|}$, *66th* convergent of the continued fraction expansion of τ is

$$\frac{p_{66}}{q_{66}} = \frac{43858015459843258294094254720 44}{16236440296341214119673681014241}$$

and so $6M < q_{66} = 16236440296341214119673681014241$. From this, we have

$$\varepsilon := \|\mu q_{66}\| - M\|\tau q_{66}\|, \ \varepsilon > 0.05, \ \mu = \frac{\log\left(1/2\sqrt{2}\right)}{\log|\delta|}.$$

So, taking $A := 5$, $B := \gamma$, and $k := m$ into account, we deduce that $m \leq 87$.

Now, consider $2 \leq m \leq 87$. Then, we can write

$$\Gamma_2 := -k\log\gamma + n\log|\delta| - \log\left(\frac{1}{2\sqrt{2}Q_m}\right)$$

and

$$\Lambda_2 := \left|e^{\Gamma_2} - 1\right| < \frac{17}{\gamma^n}.$$

It is clear that $|\Lambda_2| < \frac{17}{\gamma^n} < \frac{1}{2}$ for all $n > 4$. According to the above result of Ddamulira et al. [12], we get

$$\left| k\frac{\log\gamma}{\log|\delta|} - n + \frac{\log\left(1/2\sqrt{2}Q_m\right)}{\log|\delta|} \right| < \frac{39}{\gamma^n}.$$

Based on the Dujella-Pethő reduction lemma for $M = 1.51\times10^{29}$ $\left(M > 4n > k\right)$ and $\tau = \frac{\log\gamma}{\log|\delta|}$, *72th* convergent of the continued fraction expansion of τ is

$$\frac{p_{72}}{q_{72}} = \frac{1344141359139361157238581738156910}{4976073517847943047090943729455893}$$

and $6M < q_{72} = 4976073517847943047090943729455893$. As a result, for $m \in \{2,\ldots,87\}$, we have

$$\varepsilon_m := \|\mu_m q_{72}\| - M\|\tau q_{72}\|, \varepsilon_m > 0.008, \mu_m = \frac{\log\left(1/2\sqrt{2}Q_m\right)}{\log|\delta|}.$$

Considering $A := 39$, $B := \gamma$, and $k := n$ it follows that $n \leq 98$.

Repeating the above approaches for Λ_3 and Λ_4, we get that $m \leq 96$ and $n \leq 195$. Organizing a looping algorithm in Mathematica© for Equations (2) and (3) over the range $m \leq 96$ and $n \leq 195$ demonstrates the validity of Theorem 3.1.

The outcomes of Theorem 3.1 bestow the following salient features additionally.

Corollary 3. 3. Just as no Pell number can be written as the square of the Pell-Lucas number, no Pell-Lucas number can be written as the square of the Pell number.

Proof. For the case where $m = n$, Equation (2) implies $P_k = Q_m^2$. From [23] and [24], it is known that there is no perfect powers among Pell numbers, except for $1^2 = 1$ and $13^2 = 169$. However, since 1 and 13 are not Pell-Lucas numbers, Equation (2) has no solution when $m = n$.

Similarly, for the case where $m = n$, Equation (3) implies $Q_k = P_m^2$. From [25], it is known that there are no perfect squares among Pell-Lucas numbers. Therefore, there is no integer k that satisfies the equation $Q_k = P_m^2$ when $m = n$.

Corollary 3. 4. The only coincidence of Pell and Pell-Lucas numbers is $P_2 = Q_1 = 2$.

Proof. We know from Theorem 3.1 that the only solution (k,m,n) to the equation $Q_k = P_m P_n$ is $(1,1,2)$. Substituting these values into the equation $Q_k = P_m P_n$, we get $Q_1 = P_1 P_2$, and from this, it is clear that the only solution is $Q_1 = P_2 = 2$.

4. Conclusions

In this study, we investigated the relationships between Pell and Pell-Lucas numbers through the lens of linear forms in logarithms of algebraic numbers. Specifically, we determined all Pell numbers that can be expressed as the product of two arbitrary Pell-Lucas numbers, as well as all Pell-Lucas numbers that are the product of two arbitrary Pell numbers. Our findings demonstrated that there are no Pell or Pell-Lucas numbers that can be expressed as the square of another number in their respective sequences. Additionally, we identified all common terms shared by the Pell and Pell-Lucas sequences, further enriching the understanding of these fundamental integer sequences.

An open question arising from this work is whether the product of a Pell number and a Pell-Lucas number can itself be a term in the Pell or Pell-Lucas sequence. Exploring this question could provide new insights into the structural properties and interrelations of these sequences. Future research might also consider generalizations to other related integer sequences or investigate higher-order recurrence relations under similar frameworks.

References

[1] Birol, F., Koruoğlu, Ö., Şahin, R., Demir, B., Generalized Pell sequences related to the extended generalized Hecke groups $\overline{H}_{3,q}$ and an application to the group $\overline{H}_{3,3}$, **Honam Mathematical J.,** 41, 1, 197-206, (2019).

[2] Mushtaq, Q., Hayat, U., Pell numbers, Pell-Lucas numbers and modular group, **Algebra Colloquium,** 14, 1, 97-102, (2007).

[3] Taş, N., Uçar, S., Özgür, N. Y., Pell coding and Pell decoding methods with some applications, **Contributions to Discrete Mathematics,** 15, 1, 52-66, (2020).

[4] Yılmaz, N., Çetinalp, E. K., Deveci, Ö., Öztaş, E. S., The quaternion-type cyclic-Pell sequences in finite groups, **Bulletin of the International Mathematical Virtual Institute,** 13, 1, 169-178, (2023).

[5] Koshy, T., **Pell and Pell-Lucas numbers with applications**, Springer, New York, USA, (2014).

[6] Alekseyev, M. A., On the intersections of Fibonacci, Pell, and Lucas numbers, **Integers,** 11, 3, 239-259, (2011).

[7] Bravo, J. J., Luca F., Coincidences in generalized Fibonacci sequences, **Journal of Number Theory,** 133, 6, 2121-2137, (2013).

[8] Bensella, H., Behloul, D., Common terms of Leonardo and Jacobsthal numbers, **Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo Series 2,** 73, 259-269, (2024).

[9] Chalebgwa, T. P., Ddamulira M., Padovan numbers which are palindromic concatenations of two distinct repdigits, **Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas,** 115, 108, (2021).

[10] Daşdemir, A., Varol, M., On the Jacobsthal numbers which are the product of two Modified Pell numbers, **Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Ser. A1 Math. Stat.**, 73, 3, 604-610, (2024).

[11] Daşdemir, A., Emin, A., Fibonacci and Lucas numbers as products of their arbitrary terms, **Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering**, 25, 3, 407-414, (2024).

[12] Ddamulira, M., Luca, F., Rakotomalala, M., Fibonacci Numbers which are products of two Pell Numbers, **Fibonacci Quarterly,** 54, 1, 11-18, (2016).

[13] Emin, A., Pell Numbers that can be Written as the Sum of Two Mersenne Numbers, **Bulletin of International Mathematical Virtual Institute**, 14, 1, 129-137, (2024).

[14] Emin, A., Mersenne numbers that are expressible as the summation of two Fibonacci numbers, **The Aligarh Bulletin of Mathematics**, 43, 1, 65-76, (2024).

[15] Emin, A., On The Diophantine Equation $L_m^2 + L_n^2 = 2^a$, **Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences**, 77, 8, 1128-1137, (2024).

[16] Erduvan, F., Keskin, R., Repdigits as products of two Fibonacci or Lucas numbers, **Proceedings-Mathematical Sciences,** 130, 1-14, (2020).

[17] Luca, F., Togbé, A., On the *x*-coordinates of Pell equations which are Fibonacci numbers, **Mathematica Scandinavica,** 122, 1, 18-30, (2018).

[18] Marques, D., Togbé, A., On the sum of powers of two consecutive Fibonacci numbers, **Proceedings of the Japan Academy, Series A, Mathematical Sciences**. 86, 10, 174-176, (2010).

[19] Chaves, A. P., Marques, D., A Diophantine equation related to the sum of squares of consecutive *k*-generalized Fibonacci numbers., **Fibonacci Quarterly,** 52, 1, 70-74, (2014).

[20] Sahukar, M. K., Panda, G. K., Diophantine equations with balancing-like sequences associated to Brocard-Ramanujan-type problem, **Glasnik matematički,** 54, 2, 255-270, (2019).

[21] Matveev, E. M., An explicit lower bound for a homogeneous rational linear form in the logarithms of algebraic numbers. II., **Izvestiya Mathematics,** 64, 6, 1217-1269, (2000).

[22] Dujella, A., Pethő, A., A generalization of a theorem of Baker and Davenport, **The Quarterly Journal of Mathematics**, 49, 195, 291-306, (1998).

[23] Emin, A., Ateş, F., On the exponential Diophantine equation $P_m^2 + P_n^2 = 2^a$, **Asian-European Journal of Mathematics**, (2024). https://doi.org/10.1142/S1793557124501286

[24] Pethő, A., The Pell sequence contains only trivial perfects powers, **Colloquia Mathematica Societatis Janos Bolyai**, 60, 561-568, (1992).

[25] Bravo, J. J., Das, P., Guzman, S., Laishram, S., Powers in products of terms of Pell's and Pell-Lucas sequences, **International Journal of Number Theory,** 11, 4, 1259-1274, (2015).

DOI:10.25092/baunfbed. 1628397 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 475-487, (2025)*

Prediction of notch strength ratio of a notched tensile ductile iron using multiple linear regression model

Gülcan TOKTAŞ*

Balıkesir University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering.

Geliş Tarihi (Received Date): 28.01.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 28.02.2025

Abstract

This study aims to create a model by examining the effect of the matrix structure and notch root radius on the notch strength ratio (NSR) in an alloyed ductile cast iron through multiple linear regression analysis. For this purpose, several heat treatments were applied to obtain ferritic, pearlitic/ferritic, pearlitic, tempered martensitic, lower bainitic, and upper bainitic matrix structures in cast iron. Hardness and tensile tests were applied to determine the hardness and 0.2 yield strength of matrix structures, which were then considered independent variables in the regression analysis. Additionally, tensile tests were conducted on circumferentially V-notched samples with a notch root radius range of 0.05-0.8 mm, and the notch radius was used as the third independent variable in the analysis. A model was developed by multiple regression to predict the NSR with the aid of the hardness, 0.2 yield strength, and notch radius independent variables. The analysis had an adjusted R^2 value of 0.886, which explains that 88.6 % of predicted NSR values can be varied by the hardness, 0.2 yield strength, and notch root radius. The model predicted satisfactory NSR values in matrix structures, exhibiting only minimal residuals.

Keywords: *Ductile iron, matrix structure, regression analysis, notch strength ratio*.

Sünek dökme demirde çentik mukavemet oranının çoklu doğrusal regresyon modeli ile tahmini

Öz

Bu çalışmada, alaşımlı sünek dökme demirde matris yapısı ve çentik kök yarıçapının çentik mukavemet oranına olan etkisi çoklu doğrusal regresyon analizi ile incelenerek bir

* Gülcan TOKTAŞ, gzeytin@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-0455-2107

model oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, dökme demirde ferritik, perlitik/ferritik, perlitik, temperlenmiş martensitik, alt beynitik ve üst beynitik matris yapıları elde etmek için çeşitli ısıl işlemler uygulanmıştır. Matris yapıların sertliğini ve 0,2 akma dayanımını belirlemek için sertlik ve çekme testleri uygulanmış ve bunlar regresyon analizinde bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Ayrıca, 0,05-0,8 mm çentik kök yarıçapı aralığına sahip çevresel V çentikli numuneler üzerinde çekme testleri uygulanmış ve elde edilen çentikli çekme dayanımları regresyon analizinde üçüncü bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Sertlik, 0,2 akma dayanımı ve çentik kök yarıçapı bağımsız değişkenleri ile çentik mukavemet oranını tahmin etmek için çoklu regresyon analizi yardımıyla bir model geliştirilmiştir. Analiz sonucunda, 0,886 değerinde ayarlanmış bir R^2 değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, tahmin edilen çentik mukavemet oranı değerlerinin %88,6'sının sertlik, 0,2 akma dayanımı ve çentik kök yarıçapı ile değiştirilebileceğini açıklamaktadır. Elde edilen model ile, matris yapılarda yalnızca minimal farklar sergileyen tatmin edici çentik mukavemet oranları öngörülmüştür.

Anahtar kelimeler: *Sünek dökme demir, matris yapı, regresyon analizi, çentik mukavemet oranı*.

1. Introduction

Ductile irons are not a single material; they are a family of materials that exhibit a wide range of properties achieved through microstructure control [1]. The common feature in all types is the nodular shape of graphite in their microstructure. These nodules prevent the spreading of cracks, making ductile iron tougher and more ductile than gray cast iron. The mechanical properties of these cast irons are determined by the characteristics of the nodules they contain (nodule count, nodularity, and nodule size) and the matrix structure. Due to their comparable properties to many types of steel, such as high strength and toughness, they are successfully used in a wide range of engineering applications. Due to their high strength and shock absorption capabilities, they are used in the automotive industry as crankshafts, gears, and suspension systems parts. Because of corrosion resistance, durability, and ease of installation, they are preferred in the pipeline industry as water and sewage systems. The toughness and machinability properties allow them to be used in the construction and heavy machinery industry such as pump housing and valve bodies [2].

A broad range of industrial and academic studies have been conducted to date on casting, heat treatment, surface treatments, microstructure, and mechanical properties owing to the exceptional properties of this cast iron family. Casting methods, alloying elements, and heat treatments modify the microstructure, consequently impacting mechanical qualities. The mechanical properties of ductile iron play a vital role in material selection, optimizing designs, ensuring safety, and achieving cost-effectiveness. Therefore, it becomes necessary to conduct tests per related standards for designing a part of ductile iron whose mechanical properties are unknown. Sometimes, mechanical tests may not be performed due to a lack of equipment or its calibration, a shortage of qualified personnel, a lack of time, or any other reason. In this case, machine learning can model the mechanical properties using existing variables. Machine learning algorithms derive insights from data to generate predictions or judgments autonomously. Regression is a statistical technique utilized largely for forecasting and prediction, and is strongly associated with the application of machine learning [3]. Regression is performed to

determine the relationship between dependent and independent variables and develop a prediction line and equation that best suits this relationship [4].

Multiple regression analysis is an effective instrument in materials science for elucidating relationships among numerous factors influencing material behavior [5]. It aids in anticipating material characteristics, refining processing parameters, identifying critical factors, and simulating complex interactions. This ultimately results in improved material development, design, and failure mitigation, rendering it an indispensable instrument in both research and industrial applications.

Using multiple regression analyses, many studies have tried to create models that can predict the mechanical properties of ductile iron. Kasvayee et al. [6] looked at how solidification and silicon content affect the mechanical qualities of high silicon ductile iron. They used multiple regression analysis to predict how the iron would behave under tension based on its microstructure. Dix et al. [7] used linear regression analysis to find a link between the processing factors that affect the iron's static mechanical properties and the microstructure that affects those properties for lightweight thin-walled ductile iron. Based on nearly 2000 collected data, Biswas et al. [8] studied cast irons (gray and ductile iron). They classified these data based on their chemical composition and section thickness so that they could statistically look at the hardness and tensile properties of each iron by their composition and section size and then predict mathematical models. In the end, they found that the predicted models for ductile iron had less percent error than those for gray iron. According to Franzen et al. [9], the graphite phase factors (particle count, nodule count, nodule size, and nodule distance) affect Charpy impact energies and the ductile to brittle transition curves in ductile iron. When they looked at the graphite particle count instead of the graphite nodule count, they found that the Charpy impact energy and hardness had a stronger and statistically significant relationship. The regression analysis also showed that the transition temperature was significantly linked to the microstructural factors. Laine et al. [10] modeled the yield and ultimate strength using the silicon content, pearlite fraction, and testing temperature variables. Ram and Gautam [11] studied the impacts of alloying elements on nodularity, hardness, ductility, and tensile strength by regression analysis. However, these studies mostly searched and carefully showed how the solidification parameters, chemical composition, microstructural parameters, testing temperatures, and mechanical properties are related. In terms of statistics, they didn't look at how the shapes of the notches affect the mechanical properties of ductile iron.

Notches may be present in various geometries, such as V, U, elliptic, cornered, circular, etc. These are all made deliberatively during the manufacturing process. Also, there can be constituents such as inclusions, lamellae graphites, voids, cracks, and segregations formed unconsciously in the microstructure during solidification, that act as notches. Regardless of how they are formed, all notches create high local stresses in the notch region under the applied external force. Also, the positions of these notches within the material or on the part geometry are important. Same notches can behave differently in the same materials with the same chemical composition but with different matrix structures. In this case, since the chemical composition is ruled out, the mechanical properties of the matrix structure (hardness, yield strength, and tensile strength) determine the behavior of the notch. The stress concentration factor (K_t) is usually used to characterize the notch behavior. The sharpest notches give high-stress concentrations at the notch tips with high K_t values, having higher local stresses than the nominal stress. These stresses often facilitate crack formation and cause the part to break earlier than

expected. In materials with high ductility, these local stresses can cause the crack tip to strengthen through plastic deformation, resulting in higher strength. In this case, the weakening or strengthening effect of the notch may not be understood by the K_t value. The notch strength ratio (NSR), a rate of the notched tensile strength to the unnotched tensile strength, is used to determine the evidence of strengthening or weakening under static loading. If NSR is smaller than 1, it indicates weakening, as in ceramics, close to 1, notch insensitive, as in metallic glasses, and greater than 1, the strengthening effect as in ductile crystalline materials [12].

This study aimed to search the effects of mechanical properties of matrix structures (hardness, 0.2 yield strength) and notch radius on the NSR values in ductile iron. The main goal is to model the NSR with dependent variables of hardness, 0.2 yield strength, and notch radius using multiple linear regression analysis. Ductile iron was subjected to various heat treatments to eliminate the chemical composition effect, followed by the hardness and tensile tests performed before analysis to have several hardness and 0.2 yield strength variables.

2. Materials and method

The chemical composition of the alloyed ductile iron is given in Table 1. The circumferentially notched tensile specimens were machined from the 25 mm diameter and 400 mm length rods. The specimens have 60° angled and 1 mm depth of V notches with 0.05, 0.1, 0.16, 0.25, 0.4, and 0.8 mm root radii. The specimen's geometry is given in Fig. 1. After machining, the notch radii were measured with a Mitutoyo profile projector (Japan) device at 50X magnification with a precision of 0.005 mm.

Table 1. Chemical composition of the ductile iron (wt.%).

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Mo	Fe
3.73	2.55	0.3	0.045	0.023	0.44	1.03	1.25	0.18	balance

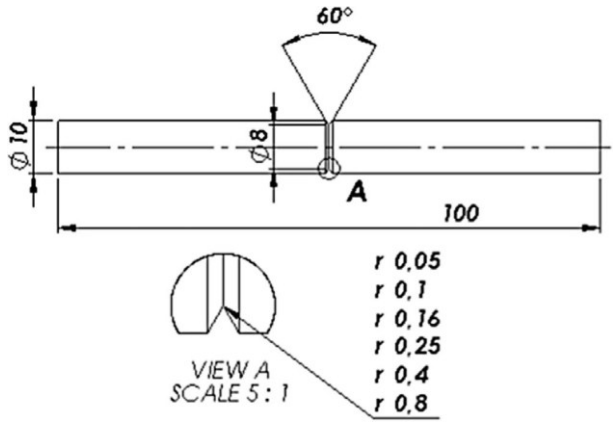


Figure 1. The sketch of the circumferentially notched tensile specimen.

Different heat treatments were applied to get various matrix structures and mechanical properties in the sole chemical composition to eliminate the effect of ductile iron's composition on the regression analysis. The matrix structures are ferritic (F), pearlitic/ferritic (P/F), pearlitic (P), tempered martensitic (TM), lower bainitic (LB), and

upper bainitic (UB). For the F structure, specimens were homogenized at 925 °C for 7 hours, cooled in an electrical furnace until 500 °C, and left in the air. The specimens were held at 900 °C for an hour in a neutral bath, cooled until 660°C at a 2.4 °C/min cooling rate, and cooled in steady air for the P/F matrix. The Pstructure was obtained by holding the specimens at 900 °C for an hour in the neutral bath, cooled until 650 °C at 5 °C/min cooling speed, and cooled in steady air. The specimens were held at 900 °C for an hour, quenched in 80 °C heated oil, and tempered at 400 °C for an hour for the TM structure. The LB and UB structures were obtained by austenitizing at 900 °C for an hour, and held in a salt bath for an hour at 300 °C and 365 °C, respectively.

The surfaces of heat-treated specimens (with 10 mm diameter and 10 mm height) were prepared by the standard metallographic techniques, and etched with 2 % nital solution for the microstructural analysis by an Olympus microscope (Japan). The Brinell hardness tests were performed by applying a 187.5 kg load with a 2.5 mm diameter steel ball for 20 seconds per the ISO 6506-1 standard [13]. The surfaces were ground and polished before the hardness tests. Hardnesses were identified by averaging five values. The tensile tests were performed on the notched and unnotched specimens with 1 mm/min cross-head speed at room temperature. For each condition, five samples were tested and the values were averaged. The applied test procedure of the study is given in Figure 2.

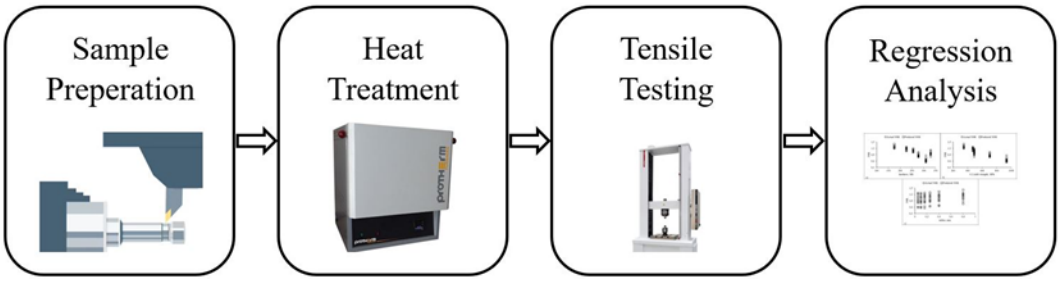


Figure 2. The applied test procedure.

After tests, multiple linear regression analysis was applied to determine the effect of hardness, 0.2 yield strength, and notch root radius (assumed as independent variables) on the NSR (dependent variable). As the matrix structure fully affects the hardness and yield strength, the contribution of microstructure in the analysis was considered in these properties. The analysis was conducted using Excel software at a confidence level of 95 %.

3. Results and discussions

The microstructures of the as-cast ductile iron with and without etching are given in Fig. 3. The cast structure is a bull's eye pearlitic due to the ferrite phase surrounding the nodules dispersed in the pearlitic matrix. The nodularity is above 90 percent, the nodule diameter is 32 µm, and the nodule count is 120 nodule/mm^2.

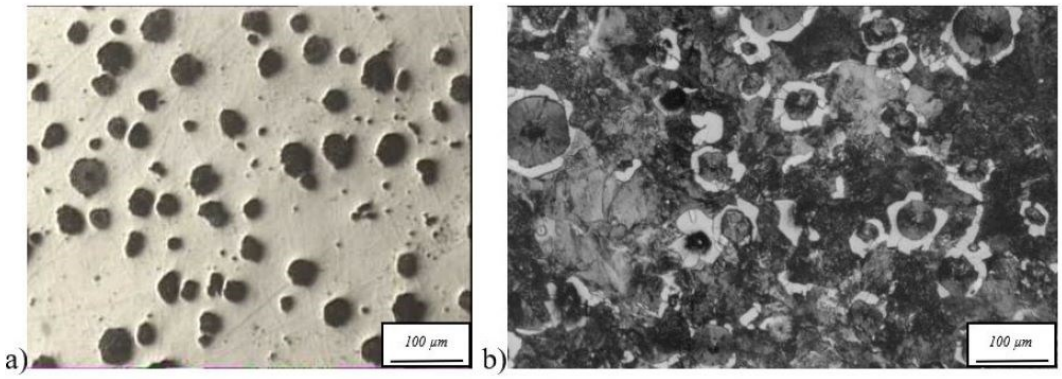


Figure 3. a) unetched and b) etched microstructures of the as-cast ductile iron.

The micrographs of F, P/F, P, TM, LB, and UB matrix structures are given in Fig. 4. The homogenization treatment provided a fully ferritic matrix due to slow cooling in the furnace (Fig. 4a). The cooling rate of 2.4 °C/min from 900 °C to 660 °C formed some pearlite in the ferritic structure (Fig. 4b). Increasing the cooling rate to 5 °C/min increased the pearlite amount. Almost a fully pearlitic structure is seen in Fig. 4c. While fine needle ferrite (dark areas) and high carbon retained austenite (white areas) are formed by austempering at 300 °C, a rougher structure is formed at 365 °C due to high diffusion condition.

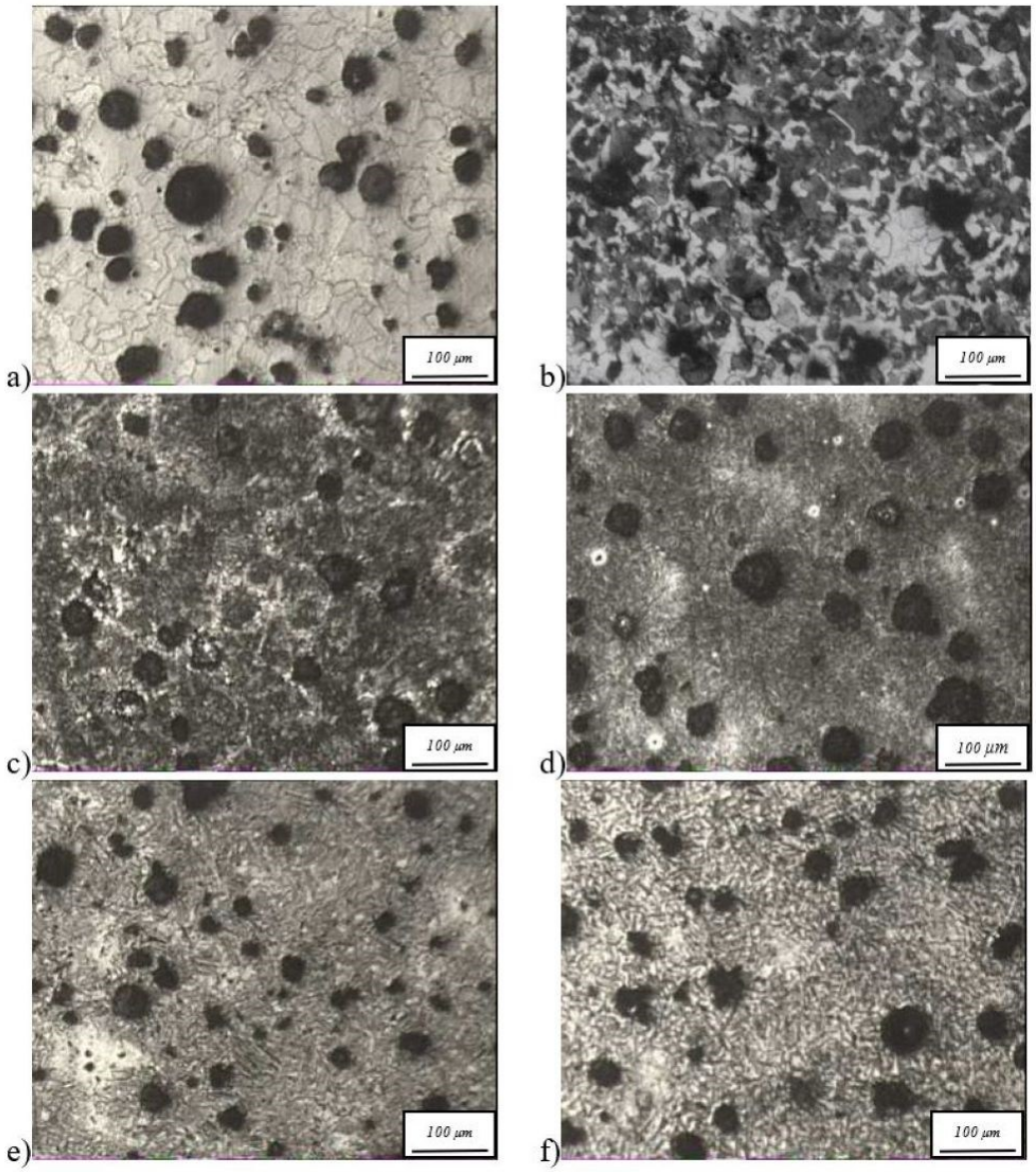


Figure 4. The microstructures of matrix structures
a) F, b) P/F, c) P, d) TM, e) LB, and f) UB.

The hardness, 0.2 yield, and ultimate tensile strengths of the unnotched specimens are given in Table 2. Since the ferrite phase is soft and ductile, the lowest hardness value was obtained in the ferritic structure. The hardness increased and elongation decreased with the amount of perlite phase in the microstructure since the pearlite phase contains lamellar Fe_3C. The upper bainitic structure has the highest hardness value of all matrix structures. As known, ausferrite is the main phase composed of ferrite and high-carbon retained austenite. At high austempering temperatures and long durations, the second stage reaction occurs in which high carbon retained austenite decomposes into carbide and ferrite. These carbides may cause an increase in hardness and a decrease in elongation. Parallely, the elongation value (3.96 %) is the lowest in the UB structure.

The tempered martensite has the highest 0.2 yield and ultimate tensile strength with low elongation values. Several reasons for this result may be; i) precipitation strengthening by cementite/alloy carbide precipitation, ii) decomposition of retained austenite into

ferrite and cementite, and iii) kinematic hardening arises from the plastic incompatibility between the matrix (ferrite) and secondary particles (cementite) [14].

Table 2. Mechanical properties of the matrix structures using unnotched samples.

Matrix	Hardness, (HB)	0.2 yield strength, (MPa)	Ultimate tensile strength, (MPa)	Elongation, (%)
F	175	345	502	10.94
F/P	226	470	635	8.37
P	255	490	682	7.1
TM	309	934	1147	5.32
LB	277	704	1025	13.12
UB	329	489	625	3.96

The tensile strengths of the circumferentially V-notched specimens and notch strength ratios (NSR) are given in Table 3. NSR values are calculated by dividing the notched tensile strength values by the unnotched tensile strength values. The F, P/F, and P structures showed NSR values greater than 1 for all notch radii. These structures have ductile ferrite phases alone or in combination and show high ductility (lower hardness and higher elongation). In ductile crystalline metals, the area between the notch root is more likely to deform plastically. This lowers the stress in that area and makes the notch radius less sharp or blunt. Because of this, the plastic deformation of ductile crystalline materials has been mostly limited in the area between the notch roots. Triaxiality stress in this area makes it easier for holes to form, which makes the sample with the notches fragile. On the other hand, they make the largest Mohr's stress circle small, which means that the average stress has to be higher than it was for the samples that weren't notched. This also has the effect of making the notch stronger [15, 16]. In the same way, Durmuş et al. [17] said that an NSR number greater than 1 means there is a lot of plasticity. Ultimately, the F, F/P, and P structures exhibiting elevated NSR values (exceeding 1) may be classified as notch-insensitive structures by having a strengthening mechanism in this study.

The NSR values of the 0.05 mm radius notched samples in F, F/P, and P structures exceed those of the 0.1 to 0.4 mm notched samples. This may result from increased strain hardening due to elevated triaxial stress and improved localized strength at the sharpest radius. Furthermore, localized residual stresses may develop during the fabrication or evaluation of the 0.05 mm notched samples, imparting enhanced strength near the notch tip and leading to an elevated NSR.

Tempered martensitic iron showed the lowest NSR values of all the matrixes. This can be attributed to the brittleness of the tempered structure in this study which has a low percent elongation value (5.32 %) showing sensitivity to the stress concentrations at the notched areas.

In all structures, the NSR increases with the notch radius. By increasing the notch radius, the stress concentration factor (Kt) decreases, reducing the local stresses at the notch tip and delaying the initiation of cracks due to the stress distributing over a larger area compared to the sharp notches with a small radius. These factors cause the structures to have lower-notch sensitivity and higher NSR values in high-notch radii samples.

Table 3. The notched tensile strengths and notch strength ratios of the matrix structures.

Matrix	**Radius, (mm)**	**Notched-tensile strength, (MPa)**	**NSR**	**Matrix**	**Radius, (mm)**	**Notched-tensile strength, (MPa)**	**NSR**
F	0.05	633.500	1.26195	TM	0.05	664.727	0,57953
	0.1	605.397	1.20597		0.1	648.529	0,56541
	0.16	603.836	1.20286		0.16	633.891	0,55265
	0.25	610.277	1.21569		0.25	736.352	0,64198
	0.4	613.789	1.22268		0.4	757.235	0,66018
	0.8	634.282	1.26351		0.8	996.701	0,86896
P/F	0.05	803.489	1.26533	LB	0.05	819.687	0,79969
	0.1	765.627	1.20571		0.1	812.466	0,79264
	0.16	749.428	1.18020		0.16	869.454	0,84824
	0.25	772.848	1.21708		0.25	871.991	0,85072
	0.4	771.287	1.21462		0.4	907.511	0,88537
	0.8	808.368	1.27302		0.8	1038.856	1,01352
P	0.05	788.461	1,15610	UB	0.05	573.976	0,91836
	0.1	742.793	1,08914		0.1	552.703	0,88432
	0.16	740.060	1,08513		0.16	504.107	0,80657
	0.25	758.406	1,11203		0.25	575.733	0,92117
	0.4	764.066	1,12033		0.4	629.012	1,00641
	0.8	816.369	1,19702		0.8	704.150	1,12664

In the multiple linear regression analysis the coefficient of determination (R^2), reflecting the correlation between the dependent variables (hardness, 0.2 yield strength, and notch radius) and NSR, was determined to be 0.896. This value indicates the validity of the multiple regression model, showing the linear relationship between dependent and independent variables. In multiple regression models, when a new independent variable is added, the R^2 value generally increases [18]. Therefore, the adjusted-R^2 value in multiple regression models is more important to be meaningful. The adjusted R^2 is 0.886 for the linear analysis, which means that 88.6 % of the change in the NSR is explained by predictor variables (hardness, 0.2 yield strength, and notch radius). The F value is 92.055, and the significance F is 8.02×10-16.

The obtained linear regression model is given below in Eq. (1) where HB is Brinell hardness, $\sigma_{0.2}$ is 0.2 yield strength (MPa), and r is the radius of the centered V notch in mm. The notch radius factor, with a coefficient value of 0.21131, is the most significant term in the NSR model. Nonetheless, the hardness and 0.2 yield strength play a minor role in the NSR model.

$$NSR = 1.75715 - 0.0014 \times HB - 0.00077 \times \sigma_{0.2} + 0.21131 \times r \quad (1)$$

The P-level is the parameter that decreases as the confidence in the outcome increases. A greater P-level indicates a lower likelihood of dependency among the dataset variables. In most circumstances, a value of 0.05 is an appropriate threshold for statistical significance. Statistically significant outcomes possess a P value of 0.01, while statistically highly significant results have a P value of 0.005 or 0.001 [19]. The hardness,

0.2 yield strength, and notch radius have statistical significance (P-values are lower than 0.05) on the NSR model with P-values of 1.05×10^{-4}, 1.51×10^{-10}, and 1.89×10^{-4}, respectively. The high value of F (used to verify the significance of the regression) and the significance levels of P much lower than 0.001 show that the regression model is highly significant.

The predicted NSR values and residuals are given in Table 4 for the analysis. Residuals represent the discrepancies between the actual observed NSR values and the predicted NSR values generated by the model. They give a discussion of the error or deviation between the model's predictions and the actual results. Residuals are significant as they reflect the adequacy of the model's fit to the data. An effective model will provide residuals randomly distributed about zero, as illustrated in Table 4, indicating that the model consistently predicts the NSR accurately, free of any discernible trend of underestimation or overestimation. Large residuals signify that the model inadequately predicts NSR for specific data points, potentially indicating the necessity for further variables or nonlinear relationships.

Table 4. The predicted NSR values and residuals for the multiple linear regression analysis.

Matrix	**Predicted NSR**	**Residuals**	**Matrix**	**Predicted NSR**	**Residuals**
F	1,253220907	0,008729093	TM	0,606111546	-0,026581546
	1,263786743	-0,057816743		0,616677382	-0,051267382
	1,276465747	-0,073605747		0,629356385	-0,076706385
	1,295484252	-0,079794252		0,648374891	-0,006394891
	1,327181761	-0,104501761		0,680072399	-0,019892399
	1,411708451	-0,148198451		0,764599089	0,104360911
F/P	1,084220778	0,181109222	LB	0,83027332	-0,03058332
	1,094786614	0,110923386		0,840839156	-0,048199156
	1,107465617	0,072734383		0,853518159	-0,005278159
	1,126484123	0,090595877		0,872536665	-0,021816665
	1,158181631	0,056438369		0,904234173	-0,018864173
	1,242708321	0,030311679		0,988760863	0,024759137
P	1,027929787	0,128170213	UB	0,924842911	-0,006482911
	1,038495623	0,050644377		0,935408748	-0,051088748
	1,051174627	0,033955373		0,948087751	-0,141517751
	1,070193132	0,041836868		0,967106256	-0,045936256
	1,10189064	0,01843936		0,998803765	0,007606235
	1,18641733	0,01060267		1,083330455	0,043309545

Fig. 5 illustrates the tested and predicted results of the independent variables (hardness, 0.2 yield strength, and notch radius) on the NSR. Fig. 5a shows that the NSR decreases slightly as the hardness increases, indicating that higher hardness might reduce the notched strength ratio. The inverse relationship between hardness and NSR is also evident from the negative sign of the hardness variable coefficient (-0.0014) in the mathematical model given by Eq. 1. High matrix hardness provides low ductility, which means the plastic deformation at the notch root is more effectively prevented. As a result, crack formation accelerates, leading to a decrease in the NSR.

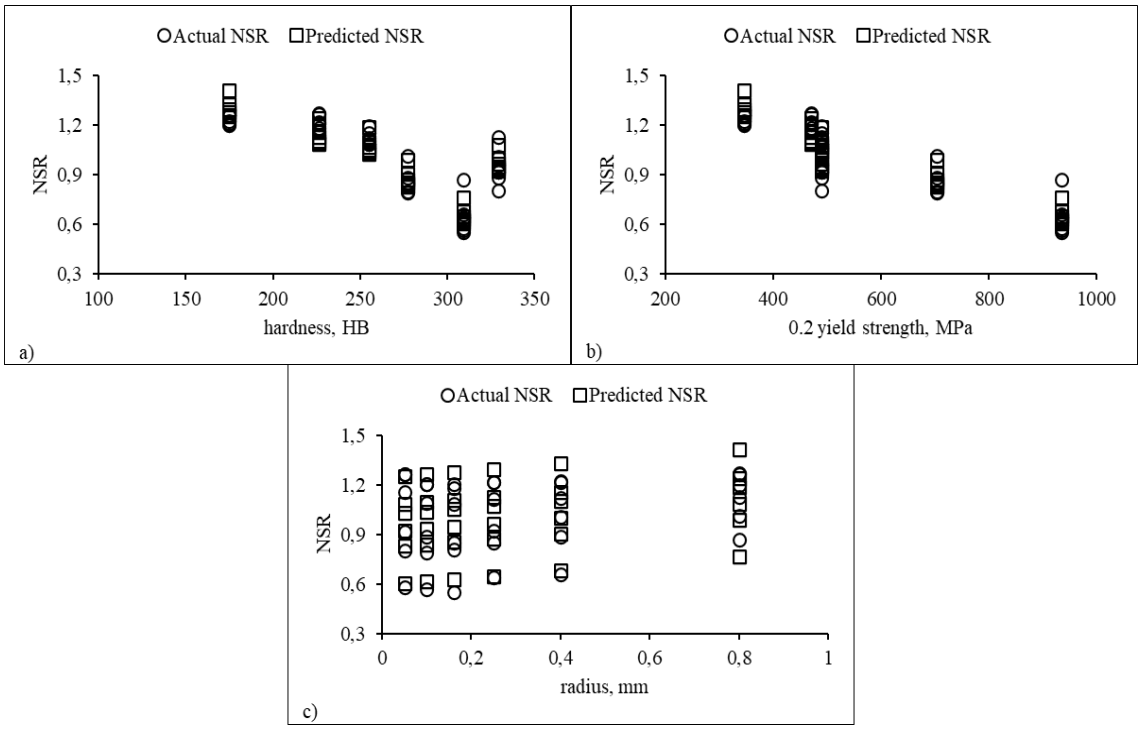


Figure 5. The tested and predicted results of the
a) hardness, b) 0.2 yield strength, and c) radius on the NSR.

As the yield strength increases, the NSR seems to decrease, suggesting that materials with higher yield strength may have a lower NSR (Fig. 5b). It can be inferred from the minus sign of the yield strength coefficient (-0.00077) in Eq. 1. This means that the triaxial stress at the notch root will not exceed the high yield strength. This will inhibit the redistribution of local stresses by plastic deformation at the notch, cause premature failure, and diminish notched tensile strength, decreasing the NSR.

The NSR appears to be relatively increasing with the radius, with slight variations in the measured and predicted values (Fig 5c). As the notch radius increases, the stress concentration factor (K_t) decreases according to Eq. 2 where; a is the notch depth (mm), and r is the notch radius (mm) [20]. This is not the only but the simplest stress concentration factor formula showing the effect of notch radius on K_t. Many other formulas exist for specific geometries of notched parts. Generally, K_t and NSR are inversely correlated with each other. That is increasing K_t decreases NSR and vice versa. Low K_t means reduced peak stress at the notch root and more uniform distributed stress, making the notched and unnotched strengths closer, which results in a higher NSR.

$$K_t = 2\sqrt{\frac{a}{r}} \tag{2}$$

The comparison of actual and predicted NSR indicates that our predictive model for NSR is largely consistent with the actual data but with minor discrepancies.

4. Conclusions

The influence of V-notched root radius and matrix structure on the NSR value of an alloyed ductile iron was examined experimentally. A predictive model was established

using a multiple linear regression approach, including hardness, 0.2 yield strength, and notch radius as independent variables. The results can be drawn as follows:

- The F, P/F, and P structures demonstrated NSR values exceeding 1 for all notch radii, indicating that these matrix structures are notch insensitive.
- The notch radius improved NSR values for all matrix structures, except for a 0.05 mm radius. The NSR of the 0.05 mm radius notched condition was higher than that of the 0.1 mm for all matrix structures.
- The adjusted R^2 is 0.886, which indicates that the independent variables (hardness, 0.2 yield strength, and notch radius) can explain 88.6 percent of the change in the NSR. The P-values of independent variables are all lower than 0.001 showing that the regression model is highly significant.
- The predicted model yielded acceptable NSR predictions with minimal residuals. The model indicates that hardness and 0.2 yield strength exert an inverse influence, however, the notch radius positively affects the NSR.

References

[1] T. Ikedaa, N. Nodab, Y. Sano, Conditions for Notch Strength to be Higher Than Static Tensile Strength in High–Strength Ductile Cast Iron, **Engineering Fracture Mechanics**, 206, 75–88, (2019).

[2] L. Collini, A. Pirondi, Microstructural, Multilevel Simulation of Notch Effect in Ferritic Ductile Cast Iron Under Low Cycle Fatigue, **International Journal of Fatigue**, 162, (2022).

[3] H. T. Quraishi, M. A. Siddiqui, D. M. Naqvi, M. Zeeshan, M. Waseem, Z. Noreen, Machine Learning Prediction of Mechanical Properties in Reinforcement Bars: A Data-Driven Approach, **International Journal of Innovations in Science & Technology**, 6, 2, 413–425, (2024).

[4] H. Yurtkuran, M. E. Korkmaz, M. Günay, Modelling and Optimization of the Surface Roughness in High-Speed Hard Turning with Coated and Uncoated CBN Insert, **Gazi University Journal of Science GU J Sci**, 29, 4, 987–995, (2016).

[5] D. M. Jones, J. Watton, K. J. Brown, Comparison of Hot Rolled Steel Mechanical Property Prediction Models Using Linear Multiple Regression, Non-Linear Multiple Regression, and Non-Linear Artificial Neural Networks, **Ironmaking and Steelmaking**, 32, 5, 435–442, (2005).

[6] K. A. Kasvayee, E. Ghassemali, I. L. Svensson, J. Olofsson, A.E.W. Jarfors, Characterization and Modeling of the Mechanical Behavior of High Silicon Ductile Iron, **Materials Science & Engineering A**, 708, 159–170, (2017).

[7] L.P. Dix, R. Ruxanda, J. Torrance, M. Fukumoto, D.M. Stefanescu, Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Castings, **AFS Transactions**, 03, 109, 1149–1164, (2003).

[8] S. Biswas, C. Monroe, T. Prucha, Use of Published Experimental Results to Validate Approaches to Gray And Ductile Iron Mechanical Properties Prediction, **International Journal of Metalcasting**, 11, 4, 656–674, (2017).

[9] D. Franzen, B. Pustal, A. Bührig-Polaczek, Influence of Graphite-Phase Parameters on The Mechanical Properties of High-Silicon Ductile Iron, **International Journal of Metalcasting** 17, 1, 4–21, (2023).

[10] J. Laine, J. Vaara, K. Jalava, K. Soivio, J. Orkas, T. Frondelius, The Mechanical Properties of Ductile Iron at Intermediate Temperatures: The Effect of Silicon

Content and Pearlite Fraction, **International Journal of Metalcasting** 15, 2, 538–547, (2021).

[11] N. Ram, V. Gautam, Prediction of Effect of Alloying Elements on Properties of Ferritic Grade Si-Mo Ductile Cast Iron Using Regression Analysis, **Materials Today: Proceedings**, 62, 3855–3859, (2022).

[12] G. Matache, A. Paraschiv, M. R. Condruz, Tensile Notch Sensitivity of Additively Manufactured IN 625 Superalloy, **Materials**, 13, 4859, (2020).

[13] ISO 6506-1, Metallic materials-Brinell hardness test, Part 1: Test method, Switzerland, (2014).

[14] L. Wang, Mechanical Properties of Tempered Martensite, PhD Thesis, Department of Materials Science and Engineering, Monash University Victoria, Australia, (2020).

[15] R. Qu, P. Zhang, Z. Zhang, Notch Effect of Materials: Strengthening or Weakening?, **Journal of Materials Science and Technology**, 30, 6, 599–608, (2014).

[16] C. Pandey, M.M. Mahapatra, P. Kumar, N. Saini, Effect of Strain Rate and Notch Geometry on Tensile Properties and Fracture Mechanism of Creep Strength Enhanced Ferritic P91 Steel, **Journal of Nuclear Materials**, 498, 176–186, (2018).

[17] A. Durmus, H. Aydin, M. Tutar, A. Bayram, K. Yigit, Effect of the Microstructure on the Notched Tensile Strength of As-cast and Austempered Ductile Cast Irons, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: **Journal of Mechanical Engineering Science**, (2012).

[18] C. Hagquist, M. Stenbeck, Goodness of Fit in Regression Analysis – R^2 and G^2 Reconsidered, **Quality & Quantity** 32, 229–245, (1998).

[19] A. A. Kanaeva, E. N. Reshetkinab, A. T. Kanaev, Use of the Multiple Regression Analysis for Quantitative Estimation of the Mechanical Properties of Strengthened Rebars, Steel in Translation, 49, 8, 568–573, (2019).

[20] A. Bayram, A. Uguz, A. Durmus, Rapid Determination of the Fracture Toughness of Metallic Materials Using Circumferentially Notched Bars, **Journal of Materials Engineering and Performance**, 11, 5, 571–576, (2002).

DOI:10.25092/baunfbed. 1650330 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 488-500, (2025)*

Biyomimetik tasarım yaklaşımının parametrisizm manifestosu kapsamında değerlendirilmesi

Sibel MACİT İLAL*

İzmir Demokrasi Üniversitesi Mimarlık Fak. Mimarlık Böl., İzmir

Geliş Tarihi (Received Date): 03.03.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 12.03.2025

Öz

Bu makalede, biyomimetik tasarım yaklaşımlarının mimari alanda sunduğu potansiyellere rağmen kuramsal bir temelden yoksun olması sorunu ele alınmıştır. Bu bağlamda, "Biyomimetik tasarım yaklaşımları, bilgisayar destekli tasarımın kuramsal çerçevesini oluşturmayı amaçlayan Parametrisizm Manifestosu'nun ilkeleriyle ne ölçüde örtüşmektedir?" sorusuna yanıt aranmıştır. Çalışmada, biyomimetik tasarımın doğadan esinlenen analojik yaklaşımlar aracılığıyla nasıl şekillendiği ve bu süreçte parametrik tasarım ilkeleriyle nasıl kesiştiği incelenmiştir. Bu kapsamda, MAD Architects'in biyomimetik tasarım yaklaşımıyla tasarlanan projeleri seçilmiş ve bu yapılar Parametrisizm Manifestosu'nun ilkeleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Bulgular, biyomimetik tasarım ile parametrik tasarım arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve bu iki yaklaşımın bir araya gelerek yenilikçi mimari formlar ve mekânsal organizasyonlar oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, biyomimetik tasarımın doğadaki sistemlerden ilham alan analojik yaklaşımlarının, parametrik tasarımın sistematik ve algoritmik yapısıyla nasıl bütünleştiği değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, biyomimetik kavramının parametrik tasarım bağlamında kuramsal bir çerçeve içinde ele alınabileceğini göstermekte ve bu iki yaklaşımın entegrasyonunun çağdaş mimari tasarım süreçlerine yönelik yeni stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: *Biyomimetik tasarım, parametrisizm, MAD architects.*

* Sibel MACİT İLAL, sibel.macit@idu.edu.tr, http://orcid.org/ 0000-0001-9524-8567

Evaluation of the biomimetic design approach within the framework of the parametricism manifesto

Abstract

This study addresses the issue of the lack of a theoretical foundation in biomimetic design approaches despite their potential in the field of architecture. In this context, the research seeks to answer the question: "To what extent do biomimetic design approaches align with the principles of the Parametricism Manifesto, which aims to establish a theoretical framework for computer-aided design?" The study examines how biomimetic design is shaped through nature-inspired analogical approaches and how it intersects with parametric design principles. In this scope, projects designed by MAD Architects using biomimetic design principles were selected and evaluated based on the principles of the Parametricism Manifesto. The findings reveal a strong relationship between biomimetic and parametric design, demonstrating that the integration of these two approaches can lead to innovative architectural forms and spatial organizations. Specifically, the study assesses how the analogical approaches in biomimetic design, which draw inspiration from natural systems, integrate with the systematic and algorithmic structure of parametric design. The results indicate that the concept of biomimetics can be framed within the theoretical context of parametric design and that the integration of these two approaches can contribute to the development of new strategies in contemporary architectural design processes.

Keywords: *Biomimetic design, parametricism, MAD architects.*

1. Giriş

Mimarlık, tarih boyunca insanın fiziksel, sosyal ve kültürel ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik mekânlar tasarlayan bir disiplin olmuştur. İlk insan yerleşimlerinden göçebe topluluklara, sanayi devrimi sonrası değişimlerden günümüz modern toplumlarına kadar doğa, mimari tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası olmuştur. İnsanlar, barınma ihtiyaçlarını karşılarken çevrelerini gözlemlemiş ve doğal malzemelerin yanı sıra doğadaki yapılaşma biçimlerinden ilham alarak ilk yapı tekniklerini geliştirmişlerdir [1].

Günümüzde, doğadan öğrenme ve esinlenme anlayışı, teknolojik gelişmelerin de etkisiyle biyoloji biliminden yararlanarak mimarlık ve tasarım alanlarında önemli bir yer edinmiştir. Biyolojiden kopyalama, taklit etme ve öğrenme fikri, ilk olarak 1960 yılında Jack Steele tarafından "biyonik" kavramıyla ortaya atılmış, 1969 yılında ise Otto H. Schmitt tarafından "biyomimetik" terimi ilk kez kullanılmıştır [2]. Biyomimetik, yaşam anlamına gelen "bios" ve taklit etmek anlamına gelen "mimesis" kelimelerinin birleşiminden türetilmiştir. Bu yaklaşım, doğanın milyonlarca yıllık evrim sürecinde geliştirdiği stratejileri inceleyerek, insanlığın karşılaştığı sorunlara çözümler üretmeyi amaçlamaktadır [3]. Pedersen Zari [4], biyomimetik tasarımı organizma, davranış ve ekosistem düzeylerinde sınıflandırmış ve bu aşamaları form, malzeme, konstrüksiyon, süreç ve fonksiyon gibi alt başlıklarla detaylandırmıştır.

Biyomimetik tasarım, doğanın karmaşık ve düzenli organizasyonunu çözümleyerek mimariye aktarmayı hedefler. Bu süreç, bilgi teknolojilerinin gelişmesiyle daha da

kolaylaşmış ve bilgisayar destekli tasarım yaklaşımları mimarlık alanında önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Bu bağlamda, Patrik Schumacher'in 2008 yılında Venedik Bienali'nde sunduğu Parametrisizm Manifestosu, bilgisayar destekli tasarımın kuramsal çerçevesini oluşturma yönündeki tartışmalara önemli bir katkı sağlamıştır [5,6]. Schumacher manifestoda uyulması ve kaçınılması gereken bazı kurallar önererek parametrik tasarımın temel ilkelerini ortaya koymuş ve bu ilkelerin mimari biçimlenme süreçlerinde nasıl uygulanabileceğini açıklamıştır.

Biyomimetik yaklaşımın parametrik tasarım yaklaşımı ile olan ilişkisi, doğadaki sistemlerin, veri odaklı tasarım süreçleriyle nasıl entegre edilebileceğini araştıran birçok çalışmanın konusu olmuştur. Bu makalede, biyomimetik tasarım yaklaşımları Parametrisizm Manifestosu'nda ele alınan kurallar kapsamında incelenerek bu iki yaklaşımın birbirini nasıl desteklediği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda makale üç ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde biyomimetik tasarım yaklaşımları literatür bilgileri ışığında açıklanmıştır. İkinci bölümde Patric Schumacher'in ilk olarak 2008 yılında Venedik Bienali'nde sunduğu Parametrisizm Manifestosu kapsamında ele aldığı ilkeler incelenmiştir. Üçüncü ve son bölümde ise biyomimetik yaklaşımlar Parametrisizm Manifestosu kapsamında değerlendirilmiştir. Bunun için örneklem kümesi olarak, günümüz bilgi teknolojilerini tasarımlarında etkin olarak kullanan tasarım ofisi MAD Architects'in 6 yapısı seçilmiştir. MAD Architects, dünya çapında en çok ziyaret edilen mimari web sitesi olan Archdaily'in düzenlediği yarışmalarda, Building of the Year 2016, 2018, 2023, China Building of the Year 2021 ve 100 Top Projects 2021 ödüllerini kazanmıştır. Seçilen yapılar, Parametrisizm Manifestosu kapsamında ele alınan ilkeler özelinde değerlendirilerek, izlenen tasarım yaklaşımının parametrisizm ilkeleri ile bağdaşıp bağdaşmadığı irdelenmiştir.

Bu makalede, biyomimetik tasarım yaklaşımlarının Parametrisizm Manifestosu ile olan ilişkisi incelenmekte ve bu iki yaklaşımın mimari tasarımda nasıl bir araya geldiği değerlendirilmektedir. Çalışma, biyomimetik tasarımın doğadan esinlenen form arayışlarının, parametrik tasarımın dinamik ve ilişkisel yaklaşımıyla nasıl örtüştüğünü analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, MAD Architects'in biyomimetik ve parametrik tasarım ilkelerini harmanlayan projeleri, Parametrisizm Manifestosu'nun ilkeleri çerçevesinde incelenmiştir.

2. Biyomimetik tasarım yaklaşımları

Biyomimetik tasarım, mimari form arayışında doğadan öğrenme ve esinlenme anlayışını temel alan bir yaklaşımdır. Gelişen teknoloji sayesinde doğa bilimi biyolojiden yararlanma, olası formları belirleme ve daha da önemlisi tasarım problemlerinin çözümünde biyomimetik potansiyel bir alan haline gelmiştir. Biyomimetik, yaşam anlamına gelen "bios" ve taklit etmek anlamına gelen "mimesis" kelimelerinin birleşiminden türetilmiştir [7]. Bu yaklaşım, doğanın milyonlarca yıllık evrim sürecinde geliştirdiği düzen ve stratejileri inceleyerek, insanlığın karşılaştığı problemlere çözümler üretmeyi amaçlamaktadır.

Biyomimetik tasarım yaklaşımları, genellikle üç temel düzeyde incelenmektedir: organizma, davranış ve ekosistem [8].

Organizma düzeyinde biyomimetik: Bu yaklaşım, belirli bir organizmanın (bitki, hayvan, mikroorganizma) formunu, yapısını veya fiziksel özelliklerini taklit etmeye odaklanır.

Örneğin, bir bitkinin yaprak yapısından esinlenerek tasarlanan bir cephe sistemi, güneş ışınlarını kontrol etmek için kullanılabilir [9].

Davranış Düzeyinde Biyomimetik: Organizmaların davranışları ve çevreyle olan etkileşimleri bu yaklaşım kapsamında ele alınmaktadır. Bu düzeyde biyomimetik, özellikle akıllı bina sistemlerinde ve iklim duyarlı tasarımlarda karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, termit yuvalarının havalandırma sistemleri, binaların doğal iklimlendirme sistemlerine ilham verebilir [10].

Ekosistem Düzeyinde Biyomimetik: Bu düzeyde, doğadaki ekosistemlerin döngüsel ve sürdürülebilir organizasyonel yapılarının incelenerek tasarıma entegre edilmesi ve sistematik çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, yapıların doğal çevreyle uyumlu olmasını sağlamaya yöneliktir. Örneğin, bir orman ekosisteminin enerji ve madde döngüsü, bir yerleşim alanının tasarımında kullanılabilir [8].

Günümüzde biyomimetik yaklaşımlar birçok yapının tasarlanma sürecinde başvurulan bir yöntemdir. İspanya'nın Valensiya şehrinde bulunan Oceanographic Deniz Müzesi, biyomimetik mimarlığın strüktürel uygulamalarına bir örnektir. Müzenin ince betonarme üst örtüsü, deniz kabuklarının doğal formundan esinlenerek tasarlanmıştır (Şekil 1) [10].

Şekil 1. Oceanographic binası

Münih Olimpiyat Parkı'nın üst örtüsü, örümcek ağlarının asma germe ilkesinden esinlenerek tasarlanmıştır. Bu tasarım, geniş açıklıklı strüktürlerin nasıl hafif ve dayanıklı olabileceğini gösteren bir örnektir (Şekil 2) [9].

Şekil 2. Münih olimpiyat parkı

Zimbabve'de bulunan Eastgate Centre, termit yuvalarının doğal iklimlendirme sistemlerinden esinlenerek tasarlanmıştır. Bina, termit yuvalarının havalandırma stratejilerini kullanarak, enerji tüketimini %90'a varan oranlarda azaltmayı başarmıştır. Bu, biyomimetiğin sürdürülebilir mimarlıkta nasıl kullanılabileceğine dair etkileyici bir örnektir (Şekil 3) [10].

Şekil 3. Eastgate centre

Biyomimetik yaklaşımın parametrik tasarım yaklaşımı ile olan ilişkisi, doğadaki sistemlerin, veri odaklı tasarım süreçleriyle nasıl entegre edilebileceğini araştıran birçok çalışmanın konusu olmuştur. Bu makalede, biyomimetik tasarım yaklaşımlarının Parametrisizm Manifestosu ile olan ilişkisi incelenerek, bu iki yaklaşımın mimari tasarımda nasıl bir araya geldiği ve birbirini nasıl desteklediği değerlendirilmektedir.

3. Parametrisizm manifestosu

Patrik Schumacher tarafından ilk olarak 2008 yılında Venedik Bienali'nde sunulan Parametrisizm Manifestosu, çağdaş mimarlık anlayışına yön veren önemli bir tasarım paradigması olarak kabul edilmektedir. Schumacher, parametrik tasarımın, modernizm ve postmodernizmin yerini alan yeni bir mimari stil olarak değerlendirilmesi gerektiğini öne sürmüştür [5]. Manifesto, dijital tasarım teknolojileriyle şekillenen ve doğadan esinlenen biçimsel ve işlevsel organizasyonları içeren bir yaklaşımı benimsemektedir.

Parametrisizm Manifestosu'nda Schumacher uyulması ve kaçınılması gereken bazı temel kurallar önermiştir. Bu kurallar, parametrik tasarımın temel ilkelerini oluşturmakta ve mimari biçimlenme süreçlerinde belirleyici bir rol üstlenmektedir.

3.1. Uyulması gereken kurallar

Schumacher (2008), manifestoda aşağıda açıklanan kabullerin parametrik tasarım yaklaşımında sağlanması gerektiğini belirtmiştir.

Kod Kullanımı: Parametrisizm, tasarım sürecinde algoritmik düşünce ve parametrik modelleme araçlarının kullanılmasını temel almaktadır. Bu yaklaşım, tasarımcıların karmaşık geometrileri ve dinamik sistemleri daha etkili bir şekilde manipüle etmelerine olanak tanır. Bir tasarım kod kullanılarak parametrik olarak tanımlandığında, bu kod üzerinde yapılan değişiklikler, tasarım alternatiflerinin kısa sürede oluşturulmasına ve incelenmesine olanak tanır [6]. Kod kullanımı yaklaşımının parametrisizmin temelini

oluşturduğu söylenebilir çünkü bu yöntem, tasarım süreçlerini ve formu doğrudan şekillendirmektedir.

Biçim değiştirme: Parametrisizm, formların sabit ve değişmez olması yerine, bağlamsal koşullara ve parametrelere göre dinamik olarak değişebilmesini savunmaktadır. Bu, tasarımın çevresel faktörlere, kullanıcı ihtiyaçlarına veya diğer değişkenlere göre uyum sağlaması anlamına gelmektedir. Tasarımın statik ve katı olmaktan uzak, akışkan ve değişken bir yapıya sahip olması gerekmektedir.

Bükme (sistematik olarak kıvırma) ve ilişkilendirme: Parametrisizm, tasarım öğeleri arasında akışkan ilişkiler kurmayı amaçladığından, mimari bileşenler birbirine sert geçişlerle değil, organik bir bütünlük içinde bağlanmalıdır. Geleneksel mimaride görülen dik açılar, keskin hatlar ve sert sınırlar yerine, yüzeylerin ve strüktürel elemanların kıvrılarak, bükülerek ve akışkan bir şekilde birbirine entegre edilmesi gerekir. Bu yaklaşım, doğadaki formların akışkanlığını mimariye taşır ve mekânsal deneyimi zenginleştirir. Örneğin, bir binanın cephesi, iç mekân organizasyonu ve yapısal sistemi birbiriyle uyumlu ve birbirini destekleyecek şekilde tasarlanır. Bu ilişkilendirme, tasarımın tutarlılığını ve işlevselliğini artırır. Dijital tasarım araçları sayesinde, bükülerek şekillenen yüzeyler ve organizasyonel sistemler kolayca üretilebilmektedir.

Aynı birimin değişerek tekrarlanması: Bu kural, modüler sistemlerin farklılaşarak tekrar eden birimler halinde kurgulanmasını öngörür. Bu yaklaşım, monotonluktan kaçınırken, tasarımda ritim ve çeşitlilik yaratır. Parametrik tasarım yaklaşımıyla oluşturulan karmaşık yüzeylerde, formu meydana getiren alt birimler belirli kurallar çerçevesinde farklılaşarak tekrar edebilir. Öklidyen olmayan biçimlerin tanımlandığı yüzeylerin tasarlanması sürecinde, bu değişim ve tekrar mekanizmaları parametrik modeller ve yazılan algoritmalar aracılığıyla yönlendirilebilir [6].

***Tüm sistemlerin birbiriyle ilişkili olması*:** Parametrisizm, mimari sistemlerin tek başına değil, bütüncül bir organizma gibi birlikte çalışmasını savunur. Bu kural, tasarımın tüm bileşenlerinin birbiriyle uyumlu ve bağlantılı olmasını öngörür. Mimari projelerde, cephe, yapısal sistem, iç mekân organizasyonu ve hatta çevresel faktörler gibi tüm unsurlar birbiriyle ilişkili olmalıdır. Bu, tasarımın bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını sağlar ve projenin tutarlılığını artırır.

Yerinden koparma: Bu kural tasarım öğelerinin sabit, belirli bir bağlama ait olmaktan çıkarılarak farklı ortamlara uyum sağlayabilmesini ifade etmektedir. Parametrik tasarımlar, üretici algoritmalar yardımıyla oluşturulduğunda, belirli bir başlangıç bileşeninden türetilen form, değişken parametreler sayesinde farklı bağlamlara uyarlanabilmektedir [6]. Bu ilke, tasarımın yalnızca üretildiği yere özgü olmasını değil, değişen veriler doğrultusunda farklı bağlamlara ve işlevlere uyum sağlamasını mümkün kılar. Böylece, parametrik tasarım süreci, geleneksel mimarlık anlayışında baskın olan "tasarımın yere özgü olması" düşüncesiyle çelişerek, evrenselliği ve esnekliği ön plana çıkarır.

Tasarımın formunu belirleyen parametreler değiştirildiğinde, farklı bağlamlara uygun yeni versiyonlar üretilebilir. Bu bağlamda, yerinden koparma, tasarım bileşenlerinin yalnızca tek bir bağlama hizmet eden statik elemanlar olmaktan çıkıp, parametrik yöntemlerle dönüştürülerek yeni mekânsal düzenlemelere adapte edilebilmesini sağlayan bir prensip olarak öne çıkmaktadır.

3.2. Kaçınılması Gereken Kurallar

Schumacher (2008), Parametrisizm Manifestosu'nda aşağıda açıklanan durumların parametrik tasarım yaklaşımında reddedilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Alışıldık tipolojiler: Parametrisizm, önceden belirlenmiş bina tipolojilerinin tekrarından kaçınmayı öngörür. Fonksiyonlar sabit bir kalıp içinde ele alınmamalı ve konut, ofis, ticari alan gibi kategorik ayrımlar katı bir biçimde uygulanmamalıdır.

Platonik biçimler: Simetrik, basit ve sabit geometrik formların kullanımı, parametrisizmde sınırlandırılır. Bu kural mimarinin doğadaki organik ve dinamik formlardan ilham alması gerektiğini vurgular. Kübik veya küresel gibi sabit geometriler yerine, doğadaki fraktal veya dalgalı formlar tercih edilir.

Düz çizgiler: Katı doğrusal formlar, düz çizgiler ve keskin köşeler, parametrisizmde kaçınılması gereken unsurlardır. Parametrik yaklaşım, düz çizgiler yerine kıvrımlı, akışkan ve değişken hatları benimseyen bir anlayışı savunur. Bu yaklaşım, mekânsal deneyimi daha dinamik ve ilgi çekici hale getirir.

Katı formlar: Parametrisizmde, katı, zaman içinde değişmeyen ve sabit bina formları yerine, esnek, değişken ve adapte edilebilen form anlayışı benimsenmektedir. Bu, mimarinin çevresel ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre şekillenebilmesi anlamına gelmektedir. Örneğin, bir binanın cephesi, hava koşullarına göre açılıp kapanabilen panellerle donatılabilir.

İlişkisizlik*:* Tasarım bileşenlerinin birbiriyle ilişkisiz ve bağımsız olması, parametrisizmde kaçınılması gereken bir durumdur. Parametrisizm, tasarımın bütüncül bir sistem içinde ilişkilendirilmesi gerektiğini vurgular. Bina cephesi, iç mekân organizasyonu ve yapısal sistem gibi tüm bileşenler bütüncül bir sistem içinde parametrik olarak ilişkilendirilmelidir.

Aynı birimin tekrarı: Monoton ve tekdüze tekrarlar, parametrisizmde istenmeyen bir durumdur. Bunun yerine, farklılaşan ve çeşitlenen birimler kullanılır. Bu yaklaşım, tasarımda ritim ve çeşitlilik yaratır.

Alt parçaların basit tekrarı: Geleneksel tasarım anlayışında, modüler sistemler genellikle birebir tekrar eden öğelerden oluşur. Parametrisizm ise bu modüler düzenin esnek, değişken ve farklılaşabilir olması gerektiğini savunur.

3.3. Parametrisizm ve biyomimetik tasarım yaklaşımları

Parametrisizm, doğadan ilham alan tasarım anlayışlarıyla birçok ortak noktaya sahiptir. Biyomimetik tasarım yaklaşımlarında olduğu gibi, parametrisizm de doğal sistemlerin organizasyonel ilkelerini analiz ederek tasarım süreçlerine entegre etmeyi hedefler. Doğal formlar, malzemeler ve yapılar üzerinden geliştirilen biyomimetik tasarımlar, parametrik yöntemlerle optimize edilerek organik ve sürdürülebilir yapılar oluşturulmasını sağlamaktadır.

Bu bağlamda, biyomimetik tasarım yaklaşımlarının Parametrisizm Manifestosu kapsamında değerlendirilmesi, iki yöntemin ortak ve ayrışan yönlerini ortaya koyarak günümüz mimari üretiminde nasıl bir etkileşim içinde olabileceklerini anlamak açısından önemlidir.

4. MAD Architects tasarımlarının parametrisizm manifestosu kapsamında değerlendirilmesi

MAD Architects merkezi Pekin, Çin'de bulunan, Los Angeles, New York ve Roma'da ofisleri bulunan günümüz mimarlık pratiğinde biyomimetik yaklaşımları ve parametrik tasarım tekniklerini başarıyla harmanlayan öncü bir tasarım ofisidir. Günümüz bilgi teknolojilerini tasarımlarında etkin olarak kullanan MAD Architects, dünya çapında en çok ziyaret edilen mimari web sitesi olan Archdaily'in düzenlediği yarışmalarda, Building of the Year 2016, 2018, 2023, China Building of the Year 2021 ve 100 Top Projects 2021 ödüllerinin sahibidir [11]. Bu bölümde, MAD Architects'in anolojik yaklaşımla tasarladığı seçilmiş yedi projesi (Çin Filarmoni Salonu, Taichung Kongre Merkezi, Ordos Müzesi, Harbin Taiping Uluslararası Havalimanı T3, Chaoyang Park Plaza ve Harbin Opera Binası) Parametrisizm Manifestosu'nun uyulması ve kaçınılması gereken kuralları çerçevesinde incelenecektir. Her bir yapı, biyomimetik tasarımın doğadan esinlenen formları ile parametrik tasarımın dinamik ve ilişkisel yaklaşımının nasıl bir araya geldiğini göstermektedir.

Çin filarmoni salonu: Pekin'de yer alan Çin Filarmoni Salonu, MAD Architects'in parametrik ve biyomimetik tasarım yaklaşımlarını birleştirdiği önemli projelerden biridir. Yapının ana konser salonunun oturma düzeninde üzüm bağlarından, tavanının tasarımında ise lotus çiçeğinden esinlenilmiştir (Şekil 4) [11]. Yapının formu hafifçe bükülmüş, kıvrımlı ve geçirgen yüzeylerle şekillendirilmiştir. Dış kabuğunda kullanılan yarı saydam malzeme, ışığı iç mekânda yumuşak bir şekilde dağıtarak iç-dış ilişkisinin akışkanlığını sağlamaktadır. Bu bağlamda, yapı "biçim değiştirme" ve "bükme" ilkelerine uygun bir şekilde tasarlanmıştır. İç mekânda akustik veriler doğrultusunda parametrik olarak modellenmiş yüzeyler kullanılmıştır, bu da "kod kullanımı"nın tasarım sürecine entegre edildiğini göstermektedir. Aynı zamanda, filarmoni salonu ve çevresi birbiriyle ilişkili şekilde kurgulanmış olup "tüm sistemlerin birbiriyle ilişkili olması" ilkesi gözetilmiştir. Yapıda düz çizgilerden ve katı geometrilerden kaçınılmış, sert geçişler yerine yumuşak ve kıvrımlı formlar tercih edilmiştir, bu da manifestonun kaçınılması gereken kurallarına uygun bir tasarım anlayışını ortaya koymaktadır.

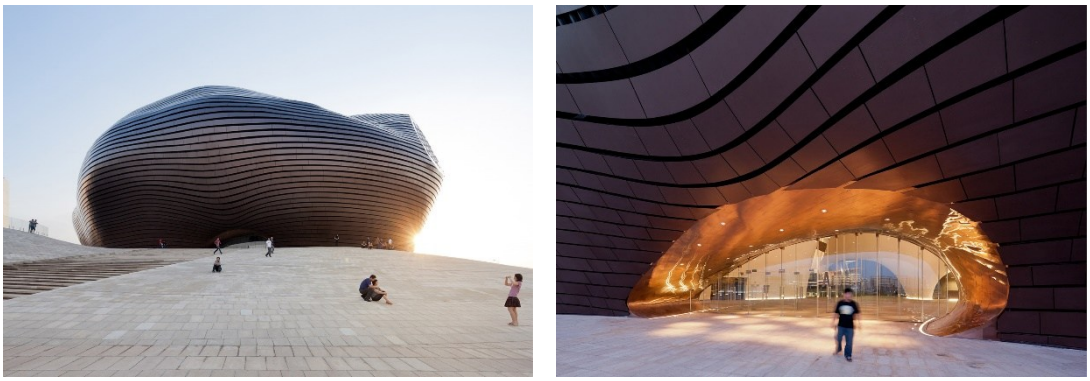
Şekil 4. Çin filarmoni salonu, MAD Architects

Taichung kongre merkezi: Parametrik tasarım araçlarının kullanıldığı ve doğadaki jeolojik oluşumlardan esinlenerek tasarlanan bir yapıdır. Yapı formunun krater şekilli oluşumu ve kubbeli görünümü, topoğrafyanın soyut bir temsilidir (Şekil 5) [11]. Yapının organik formlu iç mekânları, rüzgârın kaya yüzeylerinde oluşturduğu aşınma desenleri taklit edilerek modellenmiştir. Bu bağlamda mekanlar arasında akıcı bir geçiş sağlanmış ve "tüm sistemlerin birbiriyle ilişkili olması" ilkesi gözetilmiştir. Tavan yüzeyleri, parametrik modelleme ile belirlenen organik boşluklarla şekillendirilmiş, ışık ve hava

akışını optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. "Aynı birimin değişerek tekrarlanması" ilkesi, tavanın ve cephe açıklıklarının tasarımında uygulanmış, modüler ancak farklılaşabilen bir sistem oluşturulmuştur. Tasarımın farklı bağlamlara uyum sağlayabilecek esnek bir yapıya sahip olması "Yerinden koparma" ilkesi ile de örtüşmektedir. Yapı, alışıldık dik açılı konferans salonları yerine serbest formlu mekânlara sahiptir, böylece "alışıldık tipolojiler"den kaçınılmıştır.

Şekil 5. Taichung kongre merkezi, MAD Architects

Ordos müzesi: Çin'in İç Moğolistan bölgesinde yer alan Ordos Müzesi, bölgenin kumul biçimlerinden esinlenerek ve parametrik tasarım yöntemleriyle tasarlanmıştır (Şekil 6) [11]. Yapının formu kıvrımlı ve yumuşak geçişlere sahip olup, parametrik tasarımın "biçim değiştirme" ve "bükme" kurallarına uygun şekilde oluşturulmuştur. Yapının bronz renkli metal panellerden oluşmuş dış kabuğu, yerel rüzgar akışlarını ve doğal erozyon süreçlerini simüle eden parametrik modelleme yöntemleriyle şekillendirilmiştir. Geleneksel müze planlamalarındaki katı formlar yerine, esnek iç mekân organizasyonu benimsenmiş, böylece "katı formlardan kaçınma" ilkesi uygulanmıştır. Ayrıca, müzenin iç mekân tasarımı da dış kabuğuyla birlikte parametrik bir bütünlük içinde şekillendirilmiş ve "tüm sistemlerin birbiriyle ilişkili olması" ilkesi desteklenmiştir.



Şekil 6. Ordos müzesi, MAD Architects

***Harbin taiping uluslararası havalimanı T3*:** Harbin Taiping Uluslararası Havalimanı T3 terminalinin tasarımı çevredeki manzaranın organik eğimlerine ve bölgenin uçsuz bucaksız kar ve buzuna gönderme yapmaktadır (Şekil 7) [11]. Bu yapı parametrik tasarım süreçlerinin etkin kullanıldığı projelerden biridir. Büyük ölçekli bir altyapı projesi olmasına rağmen, iç mekândaki akışkan tasarım yaklaşımı ve kıvrımlı yüzeyleriyle parametrik mimarlık anlayışını yansıtmaktadır. Terminalin dalgalı çatı strüktürü, kod

kullanımı ve algoritmik modelleme teknikleriyle oluşturulmuş, böylece "kod kullanımı" ilkesi benimsenmiştir. Terminalin iç mekân tasarımında tekrarlayan ancak değişen strüktürel elemanlar bulunmaktadır ve "aynı birimin değişerek tekrarlanması" ilkesi uygulanmıştır. Yapının genel formu, kış mevsiminde kar birikimini minimuma indirmek için aerodinamik olarak modellenmiş ve bu bağlamda "yerinden koparma" prensibine uygun hale getirilmiştir. Keskin köşeler ve doğrusal formlar yerine akışkan geçişlere sahip tasarım tercih edilerek, "düz çizgilerden kaçınılması" ilkesi desteklenmiştir.

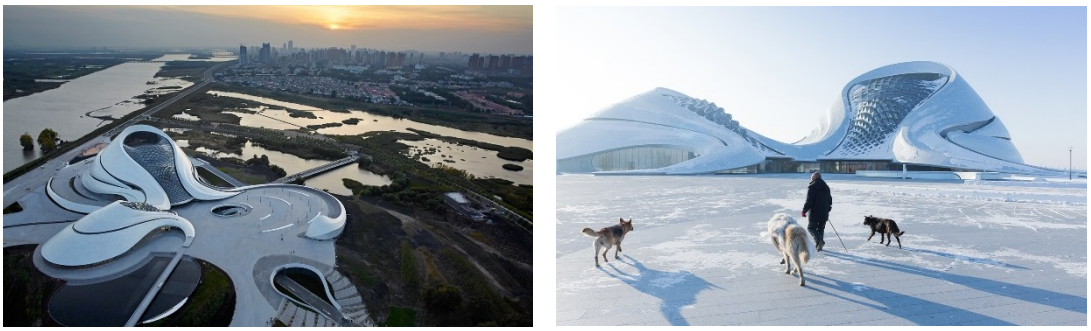
Şekil 7. Harbin taiping uluslararası havalimanı T3, MAD Architects

***Chaoyang park plaza*:** Chaoyang Park Plaza, Pekin'de konumlanmış ve dağ formasyonlarından esinlenerek tasarlanmış bir ofis ve konut kompleksidir (Şekil 8) [11]. İkiz kuleler ve çevresindeki yapı grupları, dağların siluetini andıran organik formlara sahiptir. Yapının tasarımında parametrik yöntemler kullanılarak doğal bir form elde edilmiş ve "biçim değiştirme" ilkesi uygulanmıştır. Binalar arasındaki organik bağlantılar "bükme" prensibi ile kurgulanmış, sert geometrik ayrımlar yerine akışkan geçişler tercih edilmiştir. Yapılar benzer form dillerine sahip olsalar da, yükseklik ve yüzeyleri açısından farklı varyasyonlar içermesi sebebi ile "aynı birimin değişerek tekrarlanması" ilkesi gözetildiği söylenebilir. Ayrıca, geleneksel gökdelen tipolojilerinden kaçınılarak, "alışıldık tipolojilerden kaçınma" ilkesi benimsenmiştir.

Şekil 8. Chaoyang park plaza, MAD Architects

***Harbin opera binası*:** Harbin Opera Binası, akışkan ve kıvrımlı formu ve iç mekân organizasyonuyla parametrik tasarım süreçlerinin kullanıldığı projelerden biridir. Yapının formu, suyun buz tabakalarıyla etkileşiminden ilham alınarak şekillendirilmiştir ve bir buzulun erimesiyle oluşan şekilleri andırır (Şekil 9) [11]. Yapının dalgalı hatları, bölgenin kış koşullarına uygun olarak tasarlanmış ve kütlenin aerodinamik yapısını güçlendirmiştir. "Yerinden koparma" ilkesine uygun olarak, yapı yalnızca belirli bir bağlama özgü olmayan, farklı ölçeklerde yeniden üretilebilecek esnek bir sistemle tasarlanmıştır. İç mekânda, ses akustiği parametrelerine bağlı olarak şekillenen dinamik

yüzeyler mekânsal akış sürekliliğini ve "kod kullanımı" ilkesini desteklemektedir. Bu yapı, sistematik kıvırma, tüm sistemlerin ilişkili olması ve biçim değiştirme ilkelerini desteklerken, düz çizgiler ve platonik biçimlerden kaçınarak manifestoya uyum sağlamaktadır.



Şekil 9. Harbin opera binası, MAD Architects.

4.1. Değerlendirme

MAD Architects'in projeleri, biyomimetik tasarım anlayışı ve parametrik tasarım ilkelerinin nasıl etkili bir şekilde bir araya gelebileceğini göstermektedir. Parametrisizmin sunduğu dijital tasarım yöntemleri ile doğadan esinlenilen organik formlar ve akışkan mekânsal organizasyonlar tasarlanmaktadır. İncelenen yapılar, manifestoda belirtilen kod kullanımı, biçim değiştirme, bükme ve ilişkilendirme ve tüm sistemlerin birbiriyle ilişkili olması ilkelerine büyük ölçüde uyumludur. Ayrıca, platonik biçimler, düz çizgiler, katı formlar, ilişkisizlik ve alışıldık tipolojiler gibi ilkelerden kaçınıldığı görülmektedir (Tablo 1). Bu analiz, biyomimetik tasarım anlayışı ile parametrik tasarım ilkelerinin nasıl etkili bir şeklide birleştirildiğini göstermekte ve çağdaş mimari yaklaşımlara olan katkısını ortaya koymaktadır.

5. Sonuç

Bu makalede, biyomimetik tasarım yaklaşımlarının Parametrisizm Manifestosu ile olan ilişkisi incelenerek, doğadan esinlenen form arayışlarının parametrik tasarım ilkeleriyle nasıl örtüştüğü değerlendirilmiştir. Biyomimetik tasarımın organizma, davranış ve ekosistem düzeylerinde sunduğu esin kaynakları ile parametrik tasarımın dijital süreçleri arasındaki etkileşim, MAD Architects'in projeleri üzerinden analiz edilmiştir.

Biyomimetik tasarımın sunduğu potansiyellere rağmen, kuramsal bir temelden yoksun olması bu çalışmada bir sorun olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, incelenen tasarımlar Parametrisizm Manifestosu'nun ilkeleri kapsamında değerlendirildiğinde, manifestonun temel kabulleri ile büyük ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Ancak, manifestonun tüm ilkelerini eksiksiz bir şekilde karşılayan bir yapı tasarımı örneğine rastlanmamıştır. Bununla birlikte, manifestoda kaçınılması gereken kurallar arasında yer alan "aynı birimin tekrarı" ve "alt parçaların basit tekrarı" gibi unsurlar, bazı yapılarda görüldüğü için, bu tasarımların manifestoya tam anlamıyla uyum sağlamadığı tespit edilmiştir. Yapılarda parametrik tasarım yaklaşımlarının kullanılmasına rağmen, Parametrisizm Manifestosu'nun ilkeleriyle tam olarak örtüşmemesi, manifestonun kuramsal alt yapısına dair tartışmaları gündeme getirmekte ve bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, bu çalışmada biyomimetik tasarım yaklaşımlarının, bilgisayar destekli tasarımın kuramsal çerçevesini oluşturmayı hedefleyen Parametrisizm Manifestosu'nun hem uyulması gereken hem de kaçınılması gereken kurallarıyla bazı ortak noktalar taşıdığı tespit edilmiştir. Bu durum, iki yaklaşımın birbirini tamamlayıcı nitelikte olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, biyomimetik tasarım ve parametrik tasarımın bir araya gelmesi, mimarlıkta organik ve akışkan formların oluşturulmasını mümkün kılarken, aynı zamanda bilgi teknolojilerinin tasarım sürecine entegrasyonunu destekleyen yenilikçi bir yöntem sunmaktadır. Çalışmanın bulguları, biyomimetik ve parametrik tasarım yaklaşımlarının birbirini tamamlayan yönlerini ortaya koyarak, çağdaş mimari üretiminde yeni tasarım stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Tablo 1. MAD Architects tasarımlarının, biyomimetik ve parametrisizm manifestosu açısından değerlendirilmesi.

MAD Architects Tasarımlar	**Biyomimetik Tasarım Yaklaşımı**	**Parametrisizm Manifestosu İlkeleri**												
		Uyulması Gereken Kurallar						Kaçınılması Gereken Kurallar						
		Kod Kullanımı	Biçim Değiştirme	Bükme ve İlişkilendirme	Aynı Birimin Değişerek Tekrarlanması	Tüm Sistemlerin Birbiriyle İlişkili Olması	Yerinden Koparma	Alışıldık Tipolojiler	Platonik Biçimler	Düz Çizgiler	Katı Formlar	İlişkisizlik	Aynı Birimin Tekrarı	Alt Parçaların Basit Tekrarı
Çin Filarmoni Salonu	Üzüm bağlarından ve lotus çiçeğinden esinlenilmiştir.	■	■	■		■		■	■	■	■	■		
Taichung Kongre Merkezi	Jeolojik oluşumlar ve krater şeklinden esinlenilmiştir.	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Ordos Müzesi	Bölgenin kumul biçimlerinden esinlenilmiştir.	■	■	■		■			■	■	■	■		
Harbin Taiping Uluslararası Havalimanı T3	Manzara ve kar şekillerinden esinlenilmiştir.	■		■	■	■	■			■		■	■	■
Chaoyang Park Plaza	Dağ formlarından esinlenilmiştir.	■	■	■	■	■		■	■			■		
Harbin Opera Binası	Suyun buz tabakaları ile etkileşiminden esinlenilmiştir.	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■		

Kaynaklar

[1] Arslan Selçuk, S. ve Gönenç Sorguç, A., Mimarlık Tasarımı Paradigmasında Biomimesis'in Etkisi, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 22(2), 451-459, (2007).

[2] Bar-Cohen, Y., Biomimetics: Mimicking and being Inspired by Biology, **Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference**, SPIE Vol. 5759-02, San Diego, CA, (2005).

[3] Özkaban, F. A., Altun, T. D. A., Tokuç, A., Çakır, Ö. A., Köktürk, G. ve Şendemir, A., Mimarlığın Doğa ile İlişkisinde Yeni bir Boyut: Biyotasarım. **Yapı Dergisi**, 461, 48-53, (2020).

[4] Pedersen Zari, M., Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability, **SB07 NZ Sustainable Building Conference**, Auckland, (2007).

[5] Schumacher, P., Parametricism as Style-Parametricist Manifesto, 11th Architecture Biennale, Venice, (2008).

[6] Oktan, S. ve Vural, S., Bir Manifestonun Sorgusu: Parametrisizm, **Mimarlık Dergisi**, 395, (2017).

[7] Benyus, J. M., **Biomimicry: innovation inspired by nature**. New York, Morrow, (1997).

[8] Pedersen Zari, M., Biomimetic Urban Design: Ecosystem Service Provision of Water and Energy. **Buildings**, 7(1), 21, (2017).

[9] Knippers, J. ve Speck, T., Design and Construction Principles in Nature and Architecture, **Bioinspiration & Biomimetics**, 7(1), 015002, (2012).

[10] Pawlyn, M., **Biomimicry in Architecture**. Riba Publishing, (2019).

[11] MAD Architects, http://www.i-mad.com/categories/status/ (accessed at 10.01.2025).

DOI:10.25092/baunfbed. 1619214 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 501-518, (2025)*

Bulanık ikili esnek küme yardımıyla karar verme problemine matematiksel bir yaklaşım

Nihal TAŞ[1,*], Anıl PEKER[1]

[1]*Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fak. Matematik Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir.*

Geliş Tarihi (Received Date): 13.01.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 05.03.2025

Öz

Bulanık küme teorisi ve esnek küme teorisi hem teorik çalışmalar anlamında hem de çeşitli uygulamaların araştırılması anlamında sıklıkla kullanılan iki teori olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulanık küme teorisinin tek başına yeterli olmadığı durumlarda, parametre eksikliğine bağlı olarak esnek küme teorisine de gerek duyulmuştur. Daha sonra bu iki kavram bir arada kullanılarak, bulanık esnek kavramı literatüre kazandırılmış ve bulanık esnek küme kavramı ile hem teorik hem de uygulama bazlı çalışmalar elde edilmiştir. Uygulama alanlarından en çok karşımıza çıkan ise karar verme problemi üzerine yapılan çalışmalardır. Bu çalışmada, bulanık ikili esnek küme kavramı kullanılarak, ihtiyaç duyulduğu takdirde, araçlarda uygun boya seçme karar verme problemine yer verilecektir. Bu amaç için, uygun evrensel kümeler ve parametre kümesi altında üyelik fonksiyonları ve karar verme matrisi ile hangi araca hangi marka boyanın daha uygun olduğunun tespiti için çalışmalar yapılacaktır.

Anahtar kelimeler: *Bulanık ikili esnek küme, karar verme problemi, oto boyası.*

A mathematical approach to decision making problem with the fuzzy binary soft set

Abstract

Fuzzy set theory and soft set theory are two theories that are frequently used both in theoretical studies and in the research of various applications. In cases where fuzzy set theory alone is not sufficient, soft set theory is also needed due to the lack of parameters. Later, by using these two concepts together, the fuzzy soft concept was introduced to the literature and both theoretical and application-based studies were obtained with the fuzzy

[*] Nihal TAŞ, nihaltas@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-4535-4019
Anıl PEKER, anil.peker10@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4855-0108

soft set concept. One of the most common application areas is the studies on decision making problems. In this study, by using the concept of fuzzy binary soft set, the problem of deciding on the appropriate paint selection for vehicles, if needed, will be included. For this purpose, it will be tried to determine which brand of paint is more suitable for which vehicle with membership functions and decision making matrix under appropriate universal sets and parameter set.

Keywords: *Fuzzy binary soft set, decision making problem, auto paint.*

1. Giriş

Günlük hayatta karşılaşılan problemlerin birçoğu belirsizlikler çerçevesinde kendini göstermektedir. Bu belirsizliklerin giderilmesi için de belli bir karar verme problemine yanıt bulmamız gerekir. Karşılaşılan belirsizliklerden kurtulmak için, bazı teorilere ihtiyaç duyulmuştur. Örneğin, bulanık küme teorisi [1], kaba küme teorisi [2], esnek küme teorisi [3], bulanık esnek küme teorisi [4], ikili esnek küme teorisi [5] ve bulanık ikili esnek küme teorisi [6] bu amaç altında çalışılan küme teorilerinden bazılarıdır. Bu küme teorileri, hem teorik çalışmalar için hem de uygulama alanları için kullanışlı olan teorilerdir. Çeşitli karar verme problemlerinin çözümü için de bu küme teorilerinden yararlanılmaktadır. Örneğin, Çağman ve Enginoğlu, esnek matris teorisini karar verme probleminde etkili bir biçimde kullanmışlardır [7]. Kalaichelvi ve Malini, bulanık esnek küme kavramını yatırım karar verme probleminde ele almışlardır [8]. Bu çalışmanın üstüne, Özgür ve Taş, periyot kavramını da kullanarak esnek küme teorisi yardımıyla yatırım karar verme problemini tekrar çalışmışlardır [9]. Taş, Özgür ve Demir, esnek küme kavramı ile bulanık esnek küme kavramını bir arada kullanarak stok yönetimine bir karar verme uygulaması elde etmişlerdir [10]. Karaca ve Taş, esnek küme teorisi ve bulanık esnek küme teorisinden yararlanarak hem hayat hem de hayat dışı sigortalar için bir karar verme modeli oluşturmuşlardır [11]. Bu iki küme kavramının gıda mühendisliğine de uygulaması elde edilmiştir [12, 13]. Metilda ve Subhashini de günlük hayatta karşılaşılan karar verme problemine bulanık ikili esnek küme yardımıyla bir uygulama geliştirmişlerdir [14]. Kaplan, bulanık küme kavramı ile bulanık metrik uzaylar üzerinde dinamik piyasa dengesine bir uygulama elde etmiştir [15]. Ayrıca, Taş ve Kaplan tarafından bulanık esnek küme kavramı ile insansız hava araçları için de bir karar verme modeli oluşturulmuştur [16].

Biz de bu çalışmada, bulanık ikili esnek küme kavramını kullanarak ihtiyaç duyulduğu takdirde, araçlarda uygun boya seçme karar verme problemine bir model geliştireceğiz. Bunun için, öncelikle toplanan verilerin analizini yapıp, daha sonra uygun evrensel kümeler ve parametre kümesi altında bulanık ikili esnek kümeler oluşturulacaktır. Üyelik fonksiyonları ve karar verme matrisi yardımıyla da hangi araca hangi marka boyanın en uygun olacağına karar verilecektir.

2. Ön bilgiler

Bu bölümde, karar verme modelinin oluşmasında kullanılacak temel teorik kavramlara yer verilecektir.

Tanım 2.1. [3] U bir evrensel küme, E bir parametre kümesi ve $P(U)$, U kümesinin kuvvet kümesi olsun. U üzerinde (F,E) esnek kümesi $F:E\to P(U)$ olmak üzere

$$(F,E)=\{(e,F(e)):e\in E,F(e)\in P(U)\}$$

şeklinde tanımlıdır.

Tanım 2.2. [17] (F,E), U üzerinde bir esnek küme olsun. Her $e\in E$ için $F(e)=\varnothing$ ise bu durumda (F,E) esnek kümesine boş esnek küme denir ve $\varnothing$ ile gösterilir.

Tanım 2.3. [17] (F,E), U üzerinde bir esnek küme olsun. Her $e\in E$ için $F(e)=U$ ise bu durumda (F,E) esnek kümesine mutlak esnek küme denir ve U ile gösterilir.

Tanım 2.4. [4] U bir evrensel küme, E bir parametre kümesi ve $F(U)$, U kümesinin tüm bulanık alt kümelerinin bir kümesi olsun. $F_S:E\to F(U)$ olmak üzere (F_S,E) ikilisine U üzerinde bir bulanık esnek küme denir.

Tanım 2.5. [5] U_1, U_2 iki evrensel küme, E bir parametre kümesi ve $P(U_1)$, $P(U_2)$ sırasıyla U_1, U_2 kümelerinin kuvvet kümesi olsun. $F:E\to P(U_1)\times P(U_2)$ olmak üzere her $e\in E$ için

$X\subset U_1$ ve $Y\subset U_2$

olacak şekilde

$F(e)=(X,Y)$ olsun. Bu durumda, (F,E) ikilisine U_1, U_2 kümeleri üzerinde ikili esnek küme denir.

Tanım 2.6. [5] (F,E), U_1, U_2 kümeleri üzerinde bir ikili esnek küme olsun. Her $e\in E$ için $F(e)=(\varnothing,\varnothing)$ ise bu durumda (F,E) ikili esnek kümesine ikili boş esnek küme denir ve $\varnothing$ ile gösterilir.

Tanım 2.7. [5] (F,E), U_1, U_2 kümeleri üzerinde bir ikili esnek küme olsun. Her $e\in E$ için $F(e)=(U_1,U_2)$ ise bu durumda (F,E) ikili esnek kümesine ikili mutlak esnek küme denir ve E ile gösterilir.

Tanım 2.8. [6] U_1, U_2 iki evrensel küme, E bir parametre kümesi ve $F(U_1)$, $F(U_2)$ sırasıyla U_1, U_2 kümelerinin tüm bulanık alt kümelerinin kümesi olsun. $F:E\to F(U_1)\times F(U_2)$ olmak üzere her $e\in E$ için

$X \subset U_1$ ve $Y \subset U_2$

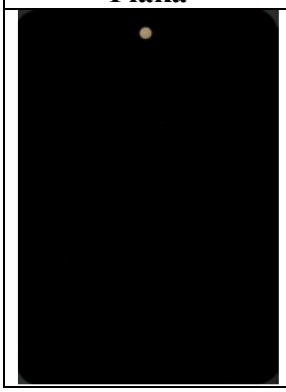
olacak şekilde

$F(e) = (X, Y)$ olsun. Bu durumda, (F, E) ikilisine U_1, U_2 kümeleri üzerinde bulanık ikili esnek küme denir.

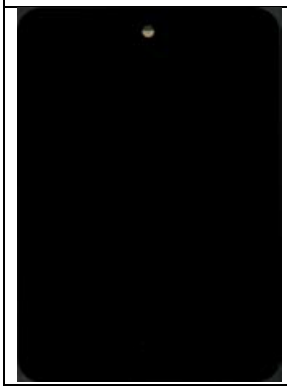
3. Ana sonuçlar

Bu bölümde, bulanık ikili esnek küme yardımı ile ihtiyaç duyulduğu takdirde, araçlarda uygun boya seçme karar verme problemine yer verilecektir. Bu amaç için, bazı marka araçların renklerine bakıldığında en uygun rengin kutu boyası (fabrikaların çıkarmış olduğu hazır boya) veya makine boyası (bilgisayardan alınan çıktı ile birleştirildiğinde renkler yardımıyla oluşan boya) olduğuna karar verip, bu boyaların plakaları oluşturuldu. Ayrıca, seçilen boyaların markalarına da dikkat edilerek, "https://www.mixitcloud.com/home/oem" sitesi yardımıyla boya içeriklerinin 0.1 kg bandında ölçümü yapıldı. Yapılan bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda ayrıntılı bir biçimde verilmiştir.

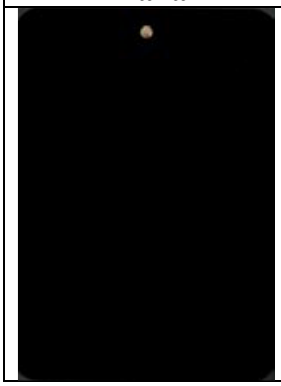
Tablo 1. VW LC9X (derin siyah) renk analizi.

VW LC9X (Derin Siyah) – Volkswagen (2004-2024)			
Akzonobel			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2840	Black	79.1 gr
	2006	Metallic Medium Fine	0.4 gr
	2655	Blue (Green)	2.8 gr
	2964	White (Blue) Pearl Fine	4.1 gr
	2670	Blue (Violet) Transparent	7.8 gr

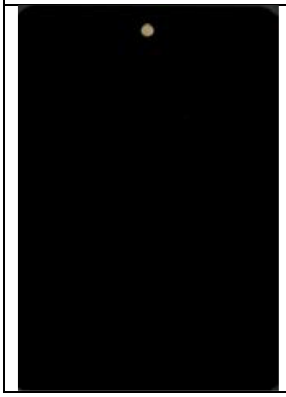
Tablo 2. BMW 9994 (black saphir) renk analizi.

BMW 9994 (Black Saphir) – BMW (2000-2024)			
Dyo			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2840	Black	69.4 gr
	2654	Blue (Green) Transparent	0.5 gr
	2001	Metallic Fine Bright	0.8 gr
	2963	White (Blue) Pearl	4.0 gr
	2000	Binder	18.7 gr

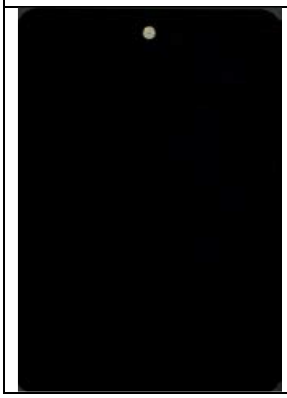
Tablo 3. MB 5218 (azurit) renk analizi.

MB 5218 (Azurit) – Mercedes Benz (1994-2000)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2670	Blue (Violet) Transparent	76.5 gr
	2203	Red (Violet) Transparent	0.6 gr
	2001	Metallic Fine Bright	1.3 gr
	2700	Violet (Blue) Transparent	3.8 gr
	2964	White (Blue) Pearl Fine	4.0 gr
	2840	Black	8.0 gr

Tablo 4. BMW X10 (tanzanite blue) renk analizi.

BMW X10 (Tanzanite Blue) – BMW (2011-2024)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2670	Blue (Violet) Transparent	47.1 gr
	2968	Blue Sparkle	9.4 gr
	2840	Black	11.6 gr
	2565	Green (Blue) Transparent	25.8 gr

Tablo 5. Honda 9647 (siyah) renk analizi.

Honda 9647 (Siyah) – Honda (2007-2025)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2840	Black	75.4 gr
	2911	White Pearl	0.1 gr
	2963	White (Blue) Pearl	0.2 gr
	2456	Yellow (Green)	0.5 gr
	2655	Blue (Green)	18.1 gr

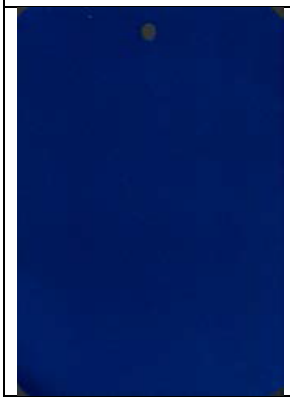
Tablo 6. SRC 9723 (phantom grey) renk analizi.

SRC 9723 (Phantom Grey) – CHERY (2022-2024)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	4000	Connector	29.0 gr
	4624	Blue (Violet) Transparent	1.3 gr
	4700	Violet (Blue) Transparent	1.8 gr
	4110	White Grey Transparent	5.9 gr
	4002	Metallic Fine	6.6 gr
	4800	Deep Black	7.2 gr
	4964	Blue (Green) Pearl Fine	20.4 gr
	4007	Metallic Extra Coarse	24.5 gr

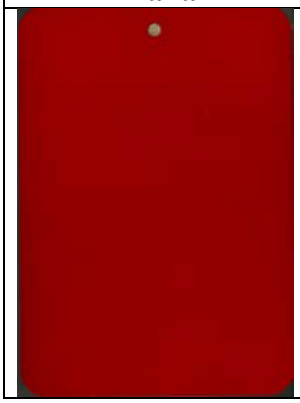
Tablo 7. Fi 798:04 (yıldız mavisi) renk analizi.

Fi 798:04 (Yıldız Mavisi) – Fiat (2004-2009)			
Akzonobel / Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2670	Blue (Violet) Transparent	33.3 gr
	2100	White	1.5 gr
	1990	Flip Toner Controller	1.8 gr
	2233	Oxide Red	2.3 gr
	2840	Black	2.7 gr
	2400	Yellow (Orange) Transparent	4.8 gr
	2001	Metallic Fine Bright	16.5 gr
	2006	Metallic Medium Fine	32.0 gr

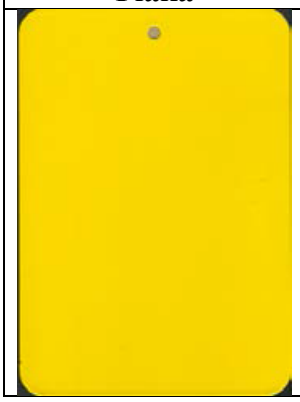
Tablo 8. DAC RPL (bleu d'azurite) renk analizi.

DAC RPL (Bleu D'Azurite) – Dacia (2012-2021)			
Akzonobel			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2624	Transparent Blueruby	49.9 gr
	2840	Black	1.0 gr
	2655	Blue (Green)	2.4 gr
	2003	Alu Coarse	4.2 gr
	2654	Blue (Green) Transparent	18.4 gr
	2001	Metallic Fine Bright	18.7 gr

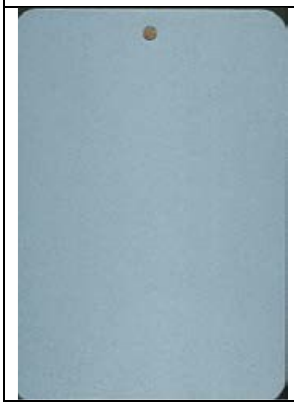
Tablo 9. VW LA3X(Y) (sunset red) renk analizi.

VW LA3X(Y) (Sunset Red) – Volkswagen (2003-2025)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2926	Red Sparkle	54.2 gr
	2005	Yellow (Orange) Metallic	0.8 gr
	2840	Black	1.2 gr
	1990	Flip Toner Controller	5.2 gr
	2232	Red (Orange) Transparent	7.9 gr
	2203	Red (Violet) Transparent	10.0 gr
	2924	Red Pearl Fine	17.9 gr

Tablo 10. CHE 72:56 (cream yellow) renk analizi.

CHE 72:56 (Cream Yellow) – Chevrolet (1972-1972)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	9450	Bright Yellow	116.0 gr
	9150	Black	0.1 gr
	9340	Dark Orange	0.1 gr
	9100	White	3.4 gr

Tablo 11. P 9357 (B) (kül grisi) renk analizi.

P 9357 (B) (Kül Grisi) – Peugeot (2000-2009)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2007	Metallic Fine	67.6 gr
	2700	Violet (Blue) Transparent	1.5 gr
	2654	Blue (Green) Transparent	4.3 gr
	2100	White	5.0 gr
	1990	Flip Toner Controller	5.1 gr
	2840	Black	5.6 gr
	2102	White Transparent	7.0 gr

Tablo 12. R 9584 (platin gri) renk analizi.

R 9584 (Platin Gri) – Renault (2004-2023)			
Dyo			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2006	Metallic Medium Fine	38.6 gr
	2654	Blue (Green) Transparent	0.3 gr
	1990	Flip Toner Controller	1.2 gr
	2840	Black	1.2 gr
	2100	White	2.2 gr
	2001	Metallic Fine Bright	26.9 gr
	2000	Binder	23.5 gr

Tablo 13. VW L0k1 (R) (oryx weiss) renk analizi.

VW L0k1 (R) (Oryx Weiss) – Volkswagen (2010-2024)			
Dyna – Pro			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	3200	White High Strength	107.7 gr
	2545	Green (Yellow) Transparent	0.1 gr
	2457	Yellow Bright	0.2 gr
	2840	Black	1.4 gr

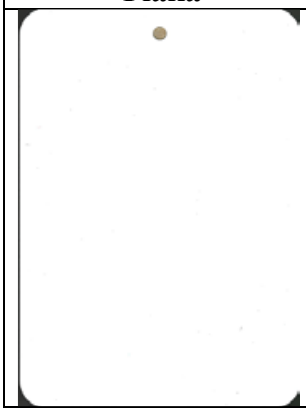
Tablo 14. DAC 369 (blanc glacier) renk analizi.

DAC 369 (Blanc Glacier) – Dacia (2008-2024)			
Dyo			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	9100	White	116.8 gr
	9560	Green	0.1 gr
	9420	Oxide Yellow	0.9 gr
	9190	Deep Black	1.1 gr

Tablo 15. FRD 9352 (aytozu grisi) renk analizi.

FRD 9352 (Aytozu Grisi) – Ford (1991-2012)			
Dyo			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	2003	Alu Coarse	53.6 gr
	2840	Black	0.2 gr
	2100	White	1.6 gr
	1990	Flip Toner Controller	3.9 gr
	2004	Alu Bright	7.9 gr
	2000	Binder	26.0 gr

Tablo 16. TOY 040 (kar beyazı) renk analizi.

TOY 040 (Kar Beyazı) – Toyota (1984-2025)			
Dyo			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	9100	White	118.2 gr
	9190	Deep Black	0.3 gr
	9420	Oxide Yellow	0.6 gr

Tablo 17. VW LB9A (şeker beyazı) renk analizi.

VW LB9A (Şeker Beyazı) – Volkswagen (1993-2024)			
Akzonobel			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	9100	White	116.6 gr
	9230	Oxide Red	0.1 gr
	9190	Deep Black	0.9 gr
	9420	Oxide Yellow	1.2 gr

Tablo 18. VW LA7A (ascot grav) renk analizi.

VW LA7A (Ascot Grav) – Volkswagen (1980-2025)			
Akzonobel			
Plaka	**Bileşenler**	**Tanımı**	**Miktar**
	9100	White	93.8 gr
	9230	Oxide Red	1.0 gr
	9190	Deep Black	8.3 gr
	9420	Oxide Yellow	12.3 gr

Verilen bu 18 tablodaki veriler kullanılarak, bulanık ikili esnek küme karar verme modelinin oluşturulması için öncelikle aşağıdaki evrensel kümeleri ve parametre kümesini belirleyelim. Evrensel kümelerin oluşmasında araç markaları ve boya markaları dikkate alınırken, parametre kümesinin oluşmasında ise renk analizinde ortaya çıkan boya çeşitleri dikkate alınacaktır.

Birinci evrensel kümeyi

$$U_1 = \{c_i : 1 \le i \le 18\}$$

şeklinde gösterelim. Burada, $c_i, 1 \le i \le 18$ elemanları aşağıda verilen tablodaki gibi tanımlıdır:

Tablo 19. Birinci evrensel kümenin elemanları.

c_1 : VW LC9X (Derin Siyah) – Volkswagen (2004-2024)
c_2 : BMW 9994 (Black Saphir) – BMW (2000-2024)
c_3 : Honda 9647 (Siyah) – Honda (2007-2025)
c_4 : BMW X10 (Tanzanite Blue) – BMW (2011-2024)
c_5 : MB 5218 (Azurit) – Mercedes Benz (1994-2000)
c_6 : SRC 9723 (Phantom Grey) – CHERY (2022-2024)
c_7 : Fi 798:04 (Yıldız Mavisi) – Fiat (2004-2009)
c_8 : DAC RPL (Bleu D'Azurite) – Dacia (2012-2021)
c_9 : VW LA3X(Y) (Sunset Red) – Volkswagen (2003-2025)
c_{10} : CHE 72:56 (Cream Yellow) – Chevrolet (1972-1972)
c_{11} : P 9357 (B) (Kül Grisi) – Peugeot (2000-2009)
c_{12} : R 9584 (Platin Gri) – Renault (2004-2023)
c_{13} : VW L0k1 (R) (Oryx Weiss) – Volkswagen (2010-2024)
c_{14} : DAC 369 (Blanc Glacier) – Dacia (2008-2024)
c_{15} : FRD 9352 (Aytozu Grisi) – Ford (1991-2012)
c_{16} : TOY 040 (Kar Beyazı) – Toyota (1984-2025)
c_{17} : VW LB9A (Şeker Beyazı) – Volkswagen (1993-2024)
c_{18} : VW LA7A (Ascot Grav) – Volkswagen (1980-2025)

İkinci evrensel kümeyi

$$U_2 = \{p_j : 1 \le j \le 3\}$$

şeklinde gösterelim. Burada, $p_j, 1 \le j \le 3$ elemanları aşağıda verilen tablodaki gibi tanımlıdır:

Tablo 20: İkinci evrensel kümenin elemanları.

p_1 : Akzonobel
p_2 : Dyo
p_3 : Dyna – Pro

Parametre kümesini

$$E = \{e_k : 1 \le k \le 41\}$$

şeklinde gösterelim. Burada, $e_k, 1 \le k \le 41$ elemanları aşağıda verilen tablodaki gibi tanımlıdır:

Tablo 21: Parametre kümesinin elemanları.

e_1 : Black	e_{22} : White
e_2 : Metallic Medium Fine	e_{23} : Flip Toner Controller
e_3 : Blue (Green)	e_{24} : Oxide Red
e_4 : White (Blue) Pearly Fine	e_{25} : Yellow (Orange) Transparent
e_5 : Blue (Violet) Transparent	e_{26} : Metallic Medium Fine
e_6 : Blue (Green) Transparent	e_{27} : Transparent Blue Ruby
e_7 : Metallic Fine Bright	e_{28} : Alu Coarse
e_8 : White (Blue) Pearl	e_{29} : Red Sparkle
e_9 : Binder	e_{30} : Yellow (Orange) Metallic
e_{10} : Red (Violet) Transparent	e_{31} : Red (Orange) Transparent
e_{11} : Violet (Blue) Transparent	e_{32} : Red Pearl Fine
e_{12} : Blue Sparkle	e_{33} : Bright Yellow
e_{13} : Green (Blue) Transparent	e_{34} : Dark Orange
e_{14} : White Pearl	e_{35} : White Transparent
e_{15} : Yellow (Green)	e_{36} : White High Strength
e_{16} : Connector	e_{37} : Green (Yellow) Transparent
e_{17} : White Grey Transparent	e_{38} : Yellow Bright
e_{18} : Metallic Fine	e_{39} : Green
e_{19} : Deep Black	e_{40} : Oxide Yellow
e_{20} : Blue (Green) Pearly Fine	e_{41} : Alu Bright
e_{21} : Metallic Extra Coarse	

Bu çalışmayı üç siyah renkte olan araba için planlayalım. Bunun için de, birinci evrensel kümenin ve parametre kümesinin alt kümelerini alalım:

$$A=\{c_1,c_2,c_3\}\subset U_1,$$

$$B=\{p_1,p_2,p_3\}=U_2$$

ve

$$E^*=\{e_1,e_2,e_3,e_4,e_5,e_6,e_7,e_8,e_9,e_{14},e_{15}\}\subset E$$

olsun. Evrensel kümelerde yer alan elemanların üyelik derecelerini hesaplamak için aşağıdaki μ_k fonksiyonunu tanımlayalım:

$$\mu_k(c_i)=\mu_k(p_i)=\begin{cases}\dfrac{E_k}{10^n} & , \quad E_k>1\\ E_k & , \quad 0\le E_k\le 1\end{cases},$$

burada $i \in \{1,2,3\}$, $k \in \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,14,15\}$, n sayısı Tablo 1 – Tablo 18 de her bir parametrenin karşı geldiği değerin tam kısmının basamak sayısı ve E_k sayısı da e_k. parametrenin Tablo 1 – Tablo 18 de karşı geldiği değerdir. Bu tanımlanan μ_k fonksiyonu yardımıyla aşağıdaki bulanık ikili esnek kümeler elde edilir:

$$\left(F_{BS}^{1}, e_1\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0.791}, \frac{c_2}{0.694}, \frac{c_3}{0.754}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0.791}, \frac{p_2}{0.694}, \frac{p_3}{0.754}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{2}, e_2\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0.4}, \frac{c_2}{0}, \frac{c_3}{0}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0.4}, \frac{p_2}{0}, \frac{p_3}{0}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{3}, e_3\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0.28}, \frac{c_2}{0}, \frac{c_3}{0.181}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0.28}, \frac{p_2}{0}, \frac{p_3}{0.181}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{4}, e_4\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0.41}, \frac{c_2}{0}, \frac{c_3}{0}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0.41}, \frac{p_2}{0}, \frac{p_3}{0}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{5}, e_5\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0.78}, \frac{c_2}{0}, \frac{c_3}{0}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0.78}, \frac{p_2}{0}, \frac{p_3}{0}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{6}, e_6\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0}, \frac{c_2}{0.5}, \frac{c_3}{0}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0}, \frac{p_2}{0.5}, \frac{p_3}{0}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{7}, e_7\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0}, \frac{c_2}{0.8}, \frac{c_3}{0}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0}, \frac{p_2}{0.8}, \frac{p_3}{0}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{8}, e_8\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0}, \frac{c_2}{0.4}, \frac{c_3}{0.2}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0}, \frac{p_2}{0.4}, \frac{p_3}{0.2}\right\}\right\},$$

$$\left(F_{BS}^{9}, e_9\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0}, \frac{c_2}{0.187}, \frac{c_3}{0}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0}, \frac{p_2}{0.187}, \frac{p_3}{0}\right\}\right\},$$

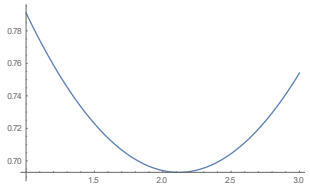
$$\left(F_{BS}^{14}, e_{14}\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0}, \frac{c_2}{0}, \frac{c_3}{0.1}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0}, \frac{p_2}{0}, \frac{p_3}{0.1}\right\}\right\}$$

ve

$$\left(F_{BS}^{15}, e_{15}\right) = \left\{\left\{\frac{c_1}{0}, \frac{c_2}{0}, \frac{c_3}{0.5}\right\}, \left\{\frac{p_1}{0}, \frac{p_2}{0}, \frac{p_3}{0.5}\right\}\right\}.$$

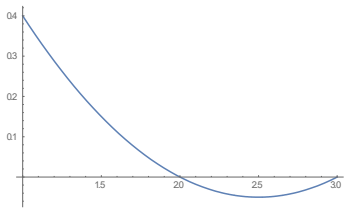
Mathematica programı yardımıyla, yukarıda tanımlanan bulanık ikili esnek kümeler için üyelik fonksiyonlarını her $x \in \{1,2,3\}$ için aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz:

$$\alpha_1(x) = 1.044999999999994 - 0.3325000000000004x + 0.07850000000000112x^2$$



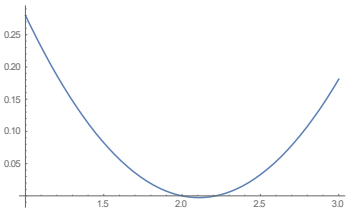
Şekil 1. α_1 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_2(x) = 1.1999999999999857 - 1.0000000000000007x + 0.20000000000000265x^2$$



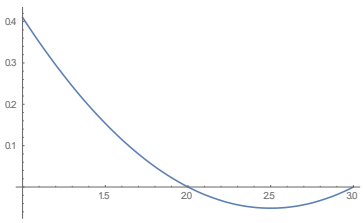
Şekil 2. α_2 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_3(x) = 1.0209999999999857 - 0.9715000000000001x + 0.23050000000000254x^2$$



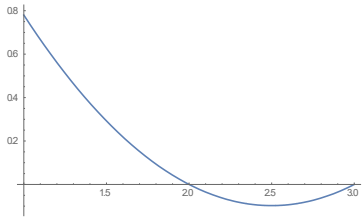
Şekil 3. α_3 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_4(x) = 1.2299999999999858 - 1.0250000000000015x + 0.20500000000000287x^2$$



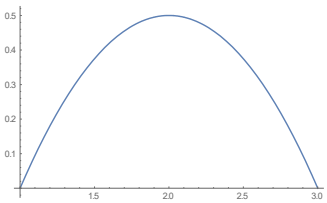
Şekil 4. α_4 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_5(x) = 2.3399999999999728 - 1.950000000000002x + 0.39000000000000523x^2$$



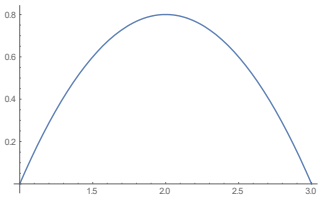
Şekil 5. α_5 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_6(x) = -1.4999999999999716 + 2.0000000000000013x - 0.5000000000000054x^2$$



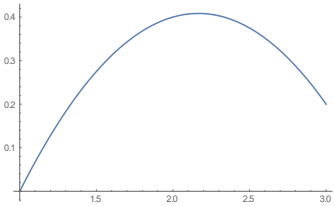
Şekil 6. α_6 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_7(x) = -2.3999999999999537 + 3.2000000000000015x - 0.8000000000000083x^2$$



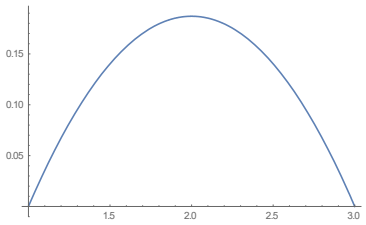
Şekil 7. α_7 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_8(x) = -0.9999999999999815 + 1.3000000000000007x - 0.30000000000000326x^2$$



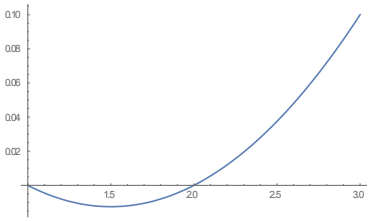
Şekil 8. α_8 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_9(x) = -0.5609999999999892 + 0.7480000000000004x - 0.18700000000000194x^2$$



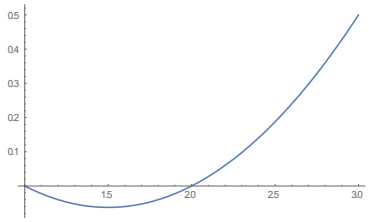
Şekil 9. α_9 üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_{14}(x) = 0.09999999999999769 - 0.15000000000000008x + 0.05000000000000041x^2$$



Şekil 10. α_{14} üyelik fonksiyonu.

$$\alpha_{15}(x) = 0.4999999999999884 - 0.7500000000000006x + 0.2500000000000021x^2$$



Şekil 11. α_{15} üyelik fonksiyonu.

Şekil 1 – Şekil 11 de de görülen α_k üyelik fonksiyonları yardımıyla

$$\mu_k(c_i) = \mu_k(p_i) = \alpha_k(x)$$

elde edilir.

$$\beta_k = \max\left\{\mu_k(c_i) : i \in \{1,2,3\}, k \in \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,14,15\}\right\}$$

olmak üzere karar verme matrisi

$$[a_{ik}] = \begin{cases} 1 & , \quad \mu_k(c_i) = \beta_i \\ 0 & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlı olsun. Bu durumda, belirlenen bulanık ikili esnek kümeler için karar verme matrisi

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

şeklinde elde edilir. Sonuç olarak, birinci araç için en uygun boya "Akzonobel", ikinci araç için en uygun boya "Dyo" ve üçüncü araç için en uygun boya "Dyna – Pro" olarak görülmüş olur.

4. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, verileri toplanan bir kısım araç için elde edilmiştir. Verileri olan araçlardan da siyah olanlar öncelikli olan değerlendirmeye alınıp, karşılaştırması ve uygun boya seçiminin yapılması araştırılmıştır. Bu karar verme modelinde, bulanık ikili esnek küme kavramından yararlanılmıştır. Benzer çalışma, daha fazla sayıda araç veya farklı renklerdeki araçlar için de çalışılabilir. Ayrıca, araçlar için uygun boya seçme karar verme problemi bulanık küme, esnek küme gibi kavramlar ile daha farklı şekillerde de modellenebilir. Bu sebeple, bu çalışmanın yeni karar verme problemi çalışmalarına da ışık tutması beklenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK'ın 1919B012333286 proje numarasıyla 2209-A-Lisans Öğrencilerine Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

[1] Zadeh, L. A., Fuzzy sets, **Information and Control**, 8, 3, 338-353, (1965).

[2] Pawlak, Z., Rough sets, **International Journal of Information and Computer Sciences**, 11, 5, 341-356, (1982).

[3] Molodtsov, D., Soft set theory-first results, **Computers and Mathematics with Applications**, 37, 19-31, (1999).

[4] Maji, P. K., Biswas, R. ve Roy, A. R., Fuzzy soft sets, The Journal of Fuzzy Mathematics, 9, 589-602, (2001).

[5] Açıkgöz, A. ve Taş, N., Binary soft set theory, **European Journal of Pure and Applied Mathematics**, 9, 4, 452-463, (2016).

[6] Gino Metilda, P. ve Subhashini, Dr. J., Remarks on fuzzy binary soft set and its characters, **International Conference on Materials and Mathematical Sciences**, (2020).

[7] Çağman, N. ve Enginoğlu, S., Soft matrix theory and its decision making, **Computers and Mathematics with Applications**, 59, 10, 3308-3314, (2010).

[8] Kalaichelvi, Dr. A. ve Malini, P. H., Application of fuzzy soft sets to investment decision making problem, **International Journal of Mathematical Sciences and Applications**, 1, 3, 1583-1586, (2011).

[9] Özgür, N. Y. ve Taş, N., A note on "application of fuzzy soft sets to investment decision making problem", **Journal of New Theory**, 7, 1-10, (2015).

[10] Taş, N., Özgür, N. Y. ve Demir, P., An application of soft set and fuzzy soft set theories to stock management, **Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences**, 21, 3, 791-796, (2017).

[11] Karaca, F. ve Taş, N., Decision making problem for life and non-life insurances, **Journal of the Institute of Science and Technology of Balıkesir University**, 20, 1, 572-588, (2018).

[12] İrkin, R., Özgür, N. Y. ve Taş, N., Optimization of lactic acid bacteria viability using fuzzy soft set modelling, **An International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications**, 8, 2, 266-275, (2018).

[13] İrkin, R., Özgür, N. ve Taş, N., Using optimization method for determining lactic acid bacteria counts in white cheese with different salt concentrations, **Journal of Food Processing and Preservation**, 46, 4, 1-10, (2022).

[14] Gino Metilda, P. ve Subhashini, Dr. J., An application of fuzzy binary soft set in decision making problems, **Webology**, 18, 6, 3672-3680, (2021).

[15] Kaplan, E., New fixed-circle results on fuzzy metric spaces with an application to dynamic market equilibrium, **Mathematica Moravica**, 27, 1, 73-83, (2023).

[16] Taş, N. ve Kaplan, E., **Unmanned aerial vehicle application to fuzzy soft set based decision-making**, Soft Computing Engineering Applications, CRC Press Taylor and Francis Group, (2025).

[17] Maji, P. K., Biswas, R. ve Roy, A. R., Soft set theory, **Computers and Mathematics with Applications**, 45, 555-562, (2003).

DOI:10.25092/baunfbed. 1618673 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 519-536, (2025)*

Generation of regular waves with FPGA based controller in a wave channel

Batın DEMİRCAN[1,3*], Sabri BIÇAKÇI[2,3]

[1]*Balıkesir University, Institute of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering, Cagis Campus, Balıkesir, Turkey.*
[2]*Balıkesir University Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Cagis Campus, Balıkesir, Turkey.*
[3]*Balıkesir University, Renewable Energy Research, Application and Development Center, Balıkesir, Turkey*

Geliş Tarihi (Received Date): 14.01.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 25.03.2025

Abstract

Wave channel systems provide crucial experimental platforms for the development and optimization of wave energy converters. By enabling the safe and repeatable simulation of real ocean conditions, these systems play a key role in understanding wave behavior and reducing design risks. They allow the generation of a specific wave model to investigate the effects of water waves on coastal structures, coastal ecosystems, and offshore platforms. In this study, a hydraulically controlled piston-type wave generator was utilized in a 24-meter-long wave channel, which measures 1 meter in width and 1 meter in height, to produce regular waves. The wave generation system in the channel is operated by a hydraulic cylinder with a 400 mm stroke, controlled by a proportional directional control valve. An NI-CRIO 9074 programmable automation controller (PAC), featuring Field Programmable Gate Array (FPGA) technology and an NI-9263 analog output module with 15-bit resolution, was used for controlling the proportional directional control valve. The cylinder position was measured at 15-bit resolution using an NI-9215 analog input module. A proportional-integral control (PI) technique was implemented on the NI-CRIO 9074 hardware. The controller gains were determined experimentally, with a computer employed to perform real-time measurement and data logging of the generated waves. The entire system is managed by the NI-CRIO 9074 and regular wave production is achieved through LabVIEW-based user interface programs running on the computer.

Keywords: *Wave channel, wave maker, FPGA, hydraulic system.*

[*]Batın DEMİRCAN, batindemircan@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-0765-458X
Sabri BIÇAKÇI, sbicakci@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-2334-8515

Bir dalga kanalında FPGA tabanlı kontrolör ile düzenli dalgaların üretimi

Öz

Dalga kanalı sistemleri, dalga enerjisi dönüştürücülerinin geliştirilmesi ve optimizasyonu için kritik deneysel platformlar sunar. Gerçek okyanus koşullarının güvenli ve tekrarlanabilir şekilde simüle edilmesini sağlayan bu sistemler, dalga davranışının anlaşılmasında ve tasarım risklerinin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Dalga kanalı sistemleri belirli bir dalga modelinin üretilmesini sağlayarak su dalgalarının kıyı yapıları, kıyı ekosistemleri ve açık deniz platformları üzerindeki etkilerinin anlaşılması için çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada toplam uzunluğu 24 metre, genişlik ve yüksekliği ise 1'er metre olan dalga kanalında düzenli dalgaların üretimi için hidrolik kontrollü ve piston tip dalga üretici kullanılmıştır. Dalga kanalında bulunan dalga üretici sisteminde 400mm stroka sahip hidrolik bir silindir ile oransal yön kontrol valfi tarafından kontrol edilmektedir. Dalga üretimi için oransal yön kontrol valfinin kontrolü için NI-CRIO 9074 paket kontrolcüsü (PAC), Field Programmable Gate Array (FPGA) donanımı yapısında ve NI-9263 analog çıkış modülü 15bit çözünürlükte kullanılmıştır. Silindirin konum bilgisi NI-9215 analog giriş modülü ile 15bit çözünürlükte ölçülmüştür. NI-CRIO 9074 donanımında kontrolör olarak oransal integral kontrol (PI) tekniği uygulanmıştır. Kontrolör katsayıların bulunmasında deneysel yöntem kullanılarak, üretilen dalgaların gerçek zamanlı olarak ölçüm ve kayıt edilmesinde bir bilgisayar kullanılmıştır. Tüm sistem NI-CRIO 9074 tarafından kontrol edilmektedir ve bilgisayarda LabVIEW tabanlı olarak geliştirilen kullanıcı ara yüz programları ile dalga kanalında düzenli dalga üretimi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Dalga kanalı, dalga üretici, FPGA, hidrolik sistem*

1. Introduction

Wave energy has been attracting increasing attention among renewable energy sources due to its considerable potential and reliability. In contrast to solar and wind energy, which can experience intermittency, wave energy in certain regions can be utilized approximately 90% of the time [1]. This consistency stems from the continuous nature of ocean waves, which are perpetually driven by wind patterns and ocean currents, thereby rendering wave energy a more stable resource. Moreover, wave energy offers a high energy density per unit area, delivering notable advantages over other renewable sources [2]. Given the rising global energy demand and the urgent need for cleaner alternatives, wave energy stands out as a sustainable option to replace fossil fuels [3]. On the other hand, naturally occurring wind waves at sea can be captured to generate electricity through wave energy converters [4-7]. When examining wave channel systems, both circular and rectangular designs are commonly observed [8,9]. These channels typically employ "flap," "piston," or "plunger" type wave makers to produce waves [10].

Wave channels and analogous simulation setups play a critical role in advancing and optimizing wave energy converters, as they allow researchers to replicate oceanic wave conditions in a controlled setting and test the performance of various converter designs. Computational Fluid Dynamics (CFD) models, often termed numerical wave tanks, have

become indispensable tools in understanding wave behavior and its interaction with wave energy converters [11]. Studies have demonstrated that numerical simulations can closely mimic wave models and validate experimental data, thereby enhancing the design process for wave energy converter systems [12]. Furthermore, wave channels offer a platform to experimentally verify theoretical models under real-world conditions, ensuring that the resulting designs are robust and efficient. This iterative simulation-and-testing process is of paramount importance for advancing wave energy technologies and securing both reliability and efficiency in power generation [13].

Several studies in the literature reflect these developments. For instance, Khalid performed experimental research in a 12 m × 0.6 m × 0.6 m wave channel using the Omey Labs Wavemaker software and reported a servo motor-driven, piston-type wave maker controlled by NI-CRIO hardware. Parameters such as wave period and wave height were input into LabVIEW, and pressure measurements were taken at different depths (channel bottom, water surface, and above the free surface). The recorded pressure data were noted to closely approximate hydrostatic pressure, with increasing wave height corresponding to higher pressure values that approached the hydrostatic level [14]. In another study, Beneduce, examined a 30 m × 2.2 m × 0.88 m wave channel featuring two electric cylinders and a flap-type wave maker. The wave period was set between 0.5 s and 2.5 s, the water depth was kept at 0.7 m, and the maximum stroke of the hydraulic actuator was 0.5 m. The wave height obtainable with this stroke was estimated using first-order wave theory, and the tank's maximum wave-generation capacity was analyzed. In addition, flap analysis, calculations for the electric motor-driven hydraulic cylinder, and selection of mechanical components for the wave channel were carried out [15].

In another study conducted by Su et al., it was reported that a servo motor-driven piston-type wave maker was controlled using Rockwell Automation hardware components, and the control software was developed in C++ within a Windows environment. Additionally, irregular waves were generated using the JONSWAP spectrum via a wave measurement sensor placed 10 meters away from the wave maker [16].

In the context of precision position control of hydraulic cylinders, Jian-Jun et al. proposed a high-accuracy position control application for a double-acting, double-rod hydraulic cylinder. To enhance tracking performance and bandwidth, they developed a feedforward compensation based on the invariance principle using pole-zero placement theory. After modeling the system as a 4th-order discrete-time system, closed-loop Bode diagrams were examined with and without the feedforward structure. A sampling time of 2 ms was employed for the hydraulic cylinder, which had a total stroke of 1350 mm [17].

Ling et al. investigated PID control for a hydraulic system containing a single-rod, double-acting hydraulic cylinder and a servo valve. In their study, data were obtained using a 100-second excitation signal composed of three sinusoidal components, and an ARX [3-3-1] model was identified with 95% accuracy. Based on this model, the "K_p," "K_i," and "K_d" coefficients of the PID controller were determined using the Ziegler-Nichols method and tested in a simulation environment before being applied to the actual system [18].

Finally, Mahdi developed both a numerical model and a second-order transfer function with no zeros for a hydraulic cylinder in the Matlab/Simulink environment. The PID

controller parameters were tuned using Matlab's PID Tuner, yielding better results compared to manual tuning methods [19].

In this study, regular waves were generated using the wave channel located in the Hydraulic Laboratory of Balıkesir University's Civil Engineering Department. The wave generation system features a piston-type wave maker driven by a hydraulic servo cylinder. The position control of the hydraulic cylinder was achieved using the NI-CRIO 9074 PAC along with analog input and output modules. The control system utilized the FPGA embedded in the NI-CRIO 9074, employing a Proportional Integral (PI) control strategy. Real-time measurement of the generated waves was performed using wave probe sensors. In the scope of this study, Material and Methods are presented in Section 2, results are detailed in Section 3, and finally, the conclusions are discussed.

2. Materials and methods

2.1. Wave channel system

The wave generation system in the channel is of a piston-type structure. The wave maker is driven by a double-acting, double-rod hydraulic cylinder, with a total stroke length of 400 mm. The hydraulic system pressure is set at a constant 50 bar, maintained continuously using hydraulic accumulators to ensure system stability. The structure of the wave channel is illustrated in Figure 1. At the beginning of the wave channel, passive dampers are employed to suppress irregular waves at the rear of the wave maker during wave generation. At the end of the channel, both passive and coastal-type wave absorbers are used to mitigate the reflection of waves produced within the channel.

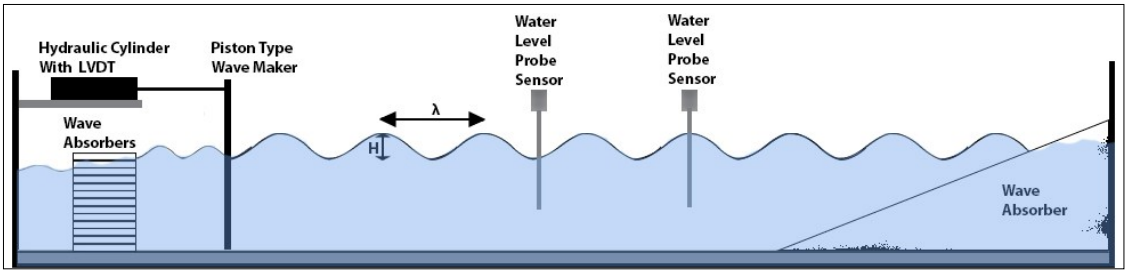


Figure 1. The structure of the wave channel

The mechanical, hydraulic, and electronic components of the wave channel in the laboratory environment are shown in Figure 2. For wave generation within the channel, the static water levels were set at 50 cm and 60 cm. Waves were generated with varying amplitudes and frequencies for different water levels.

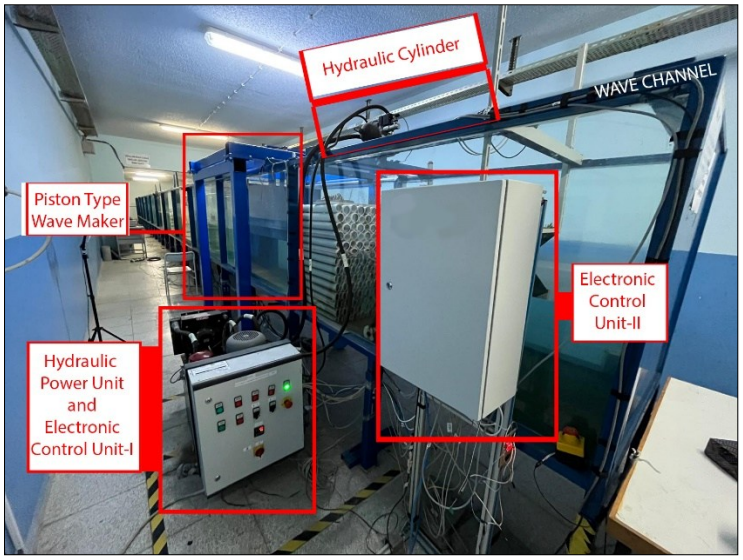


Figure 2. The structure of the wave channel

The wave generation system used in the wave channel is referred to in the literature as a "piston-type" wave maker, which operates along a single axis. The movement range of the piston-type wave maker corresponds to that of the hydraulic cylinder, spanning 0–700 mm. In this study, the initial position of the wave maker was set at 500 mm, and wave generation was performed within the range of 300–700 mm. The physical structure of the piston-type wave maker driven by the hydraulic cylinder in the wave channel is shown in Figure 3.

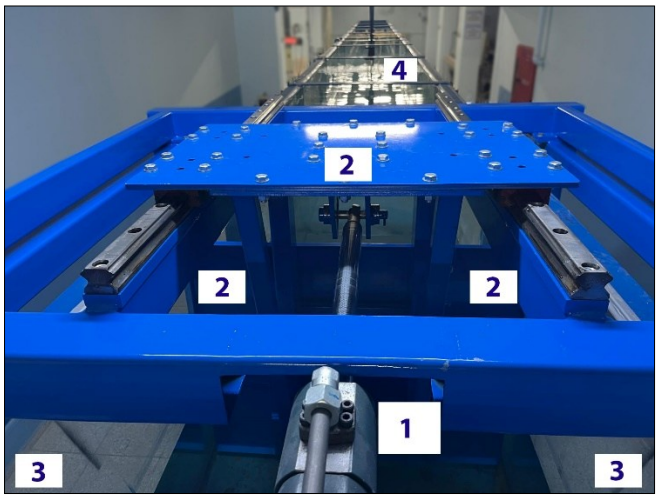


Figure 3. Top view of the wave maker: 1-hydraulic cylinder, 2-piston-type wave maker, 3-tank wall, 4-water surface

The waves generated in the wave channel propagate in a specific direction within the channel. Upon reaching the end of the channel, these waves collide with the channel wall, creating reflected waves after a certain period. To minimize the reflected waves at the end of the channel, a coastal-type wave absorber was employed, and the slope of the wave maker was set to 20%. The coastal-type wave absorber within the wave channel is shown in Figure 4.

Figure 4. Coastal type wave absorber

To visualize and control the waves generated in the wave channel in real time, measurements were taken at two different points along the channel. An electronic measurement system equipped with Wallingford resistivity probe sensors was utilized. The first probe was positioned 14 meters from the resting position of the wave maker, and the second probe was located 17 meters away from the wave maker. The probe setup used for wave measurement is shown in Figure 5. Measurements were conducted with a sampling frequency of 50 Hz, within a ±10 V range, and with 15-bit resolution. A LabVIEW interface was developed for the numerical analysis and visualization of the results. All recorded signals were analyzed in the frequency domain using the Fast Fourier Transform (FFT).

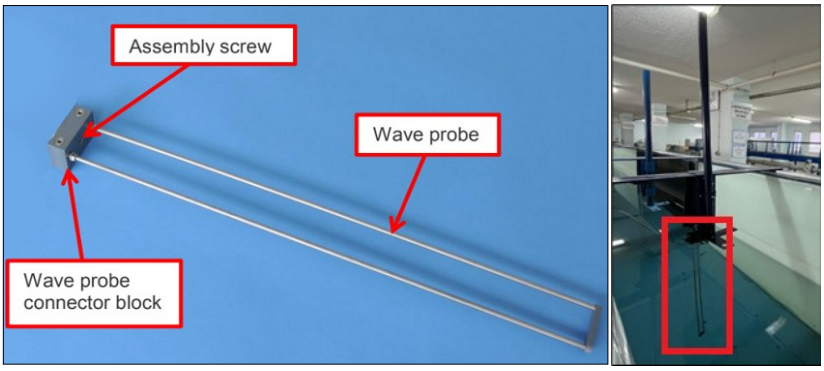


Figure 5. a) Resistive probe wave gauge b) Wave gauge system

2.2. Energy transformation

The wave generation principle of the piston-type wave maker within the wave channel is schematically illustrated in Figure 6. In this figure, key parameters such as the piston stroke "*S*(t)", wave height "*H*", wavelength "lambda (λ)", and water depth "*h*" are defined. The wave propagates in the "x" direction, while the vertical axis is taken as "z", and vertical displacements along the free surface of the wave are analyzed.

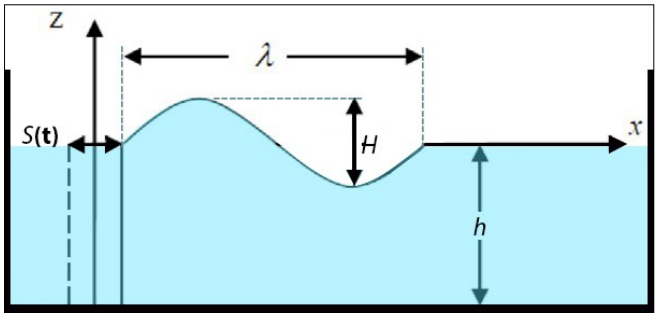


Figure 6. Piston-type wave maker

Piston Stroke "*S*(t)": The wave maker consists of a piston that moves back and forth through a hydraulic servo cylinder. The position of the piston at time "t" is expressed as the stroke value "S(t)". As the piston reaches its maximum stroke, it pushes and pulls the water mass, enabling wave formation.

Water Depth "*h*": The water depth in the wave channel refers to the distance from the bottom to the free surface. In this study, the "h" value was fixed at 50 cm and 60 cm for the regular wave experiments.

For the wave generation structure shown in Figure 1, the characteristic properties of the wave are defined as "wave height," "wavelength," and "wave period."

Wave Height "*H*": The vertical distance between the wave crest and the wave trough. If the wave amplitude is "a," then H=2a.

Wavelength "lambda (λ)": The horizontal distance between two consecutive wave crests or troughs, representing the spatial period of the wave.

Wave Period "T": The time required for one complete wave cycle to occur. The frequency is defined as f=1/T, and the angular frequency is given by ω=2πf.

The piston-type wave maker in the wave channel has a total stroke range of 400 mm. In this study, water waves generated at different piston stroke values will be analyzed using control signals with varying amplitudes and frequencies.

2.3. Wave channel controller hardware

A proportional directional control valve was used to control the hydraulic cylinder in the wave channel for forward or backward motion at the desired stroke values. The directional control valve was actuated by the controller via the NI-9263 module, operating within a ±10V range. The position of the hydraulic cylinder was transmitted to the controller through an LVDT providing a 4–20 mA output, connected to the NI-9215 module. The NI-9074 packaged controller (PAC) was utilized as the control system. The NI-9074 includes an integrated Xilinx Spartan-3 FPGA, which was selected as the hardware controller for the wave generation system. FPGA are parallel and customizable platforms designed to execute advanced processing and control tasks at hardware-level speeds. Fundamentally, an FPGA is a programmable chip comprising three primary components: logic blocks, programmable interconnects, and I/O blocks.

The synthesis of FPGA Virtual Instrument (VI) structures with physical hardware in LabVIEW differs from traditional LabVIEW for Windows or LabVIEW Real-Time applications. While the structure of the LabVIEW code remains similar to that of other targets, clicking the "Run" button in the LabVIEW software initiates a distinct process for FPGA targets. First, LabVIEW FPGA generates VHDL code, which is passed to the Xilinx compiler. The Xilinx compiler then synthesizes the VHDL code, incorporates all synthesized components into a bitstream file, and routes them accordingly. Finally, the "bitstream file" created by LabVIEW is loaded onto the FPGA, enabling it to achieve its programmed functionality [12]. The technical specifications of the NI-9074 PAC are presented in Table 1.

Table 1. NI-CRIO9074 FPGA technical specifications[20]

Feature	**Specification**
Processor	400 MHz Freescale MPC5200 real-time processor
FPGA	Xilinx Spartan-3 2M gates FPGA
Memory (RAM)	128 MB DRAM
Storage (Flash Memory)	256 MB
I/O Module Slots	8 hot-swappable C Series module slots
Ethernet Port	2
Operating System	NI Real-Time OS
Programming Languages	LabVIEW, C/C++, NI Scan Engine

To control the stroke of the hydraulic cylinder within the desired range, a sinusoidal input signal was generated in the LabVIEW FPGA environment. By entering parameters such as amplitude, frequency, and offset, the hydraulic cylinder was able to track the input signal using proportional control techniques. The NI-9215 analog input module and the NI-9263 analog output module, both compatible with the NI-9074 PAC, were employed. The NI-9263 module provided output signals within a ±10V range. The voltage signal generated in the software was used to electronically control the proportional directional control valve within the hydraulic cylinder control system, enabling the hydraulic cylinder's operation. The hydraulic cylinder has a motion range of 0–700 mm, and analog voltage signals from the LVDT integrated into the cylinder were transmitted to the FPGA via the NI-9215 module. This same module was also utilized for wave measurement. The control diagram of the FPGA-based wave channel system is shown in Figure 7. By performing position control of the hydraulic cylinder, the piston-type wave maker was actuated, producing regular water waves within the wave channel.

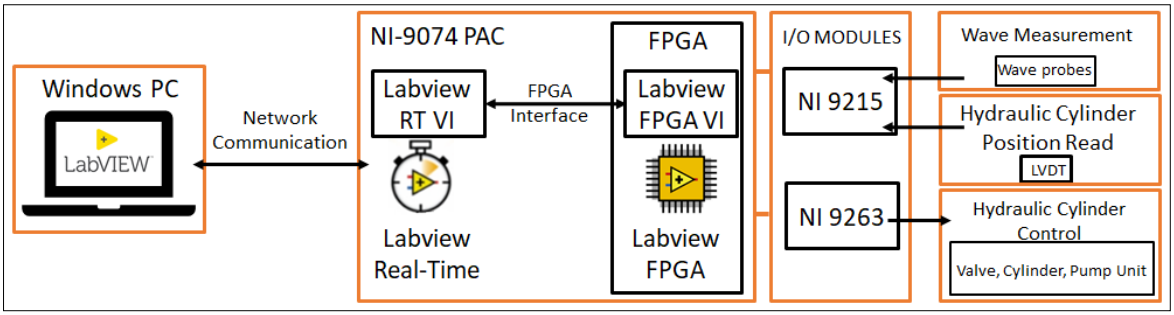


Figure 7. General structure of wave generating system

2.4. Model of the hydraulic system

To achieve position control of the hydraulic system in the wave channel, system identification was performed using the black-box method. The stimulus signal provided in Equation 1 was applied to the hydraulic directional control valve via the NI-CRIO 9074 PAC, and the position data of the hydraulic cylinder were recorded. Signals were collected for the model identification process, and no software-based controller was utilized in this configuration. The programming was solely designed to capture the position signal corresponding to the applied voltage signal.

$$y = 1.1\big(sin2\pi(0.05 * \mathrm{t})\big) + 0.5\big(\sin2\pi(0.2 * \mathrm{t})\big) + 0.8(\sin2\pi(\mathrm{t})) \quad (1)$$

The hydraulic cylinder used in the wave channel structure was selected as a double-acting, double-rod servo cylinder. This configuration minimizes speed variations during the forward and backward movements of the hydraulic cylinder. The proportional directional control valve in the hydraulic system was supplied with hydraulic fluid at a constant pressure of 50 bar by a fixed-displacement hydraulic unit with a power capacity of 4 kW. The generalized control diagram of the hydraulic system is shown in Figure 8.

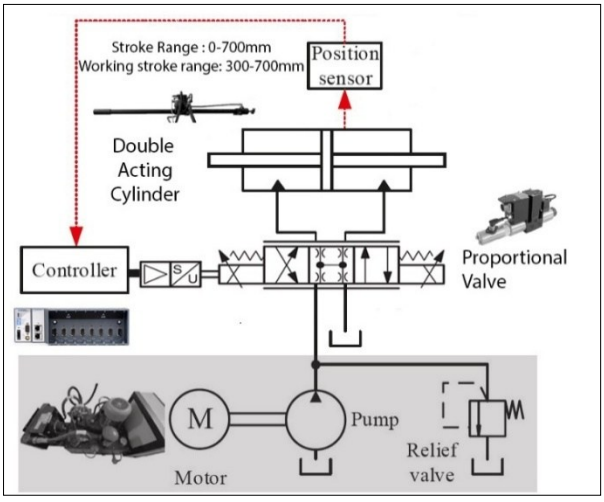


Figure 8. Hydraulic system

The control software developed for the identification of the hydraulic system operated at a cycle rate of one millisecond. The hydraulic cylinder could move within a range of 0–700 mm; however, due to the piston-type wave maker structure in the wave channel, the working range was set to 300–700 mm. The resting position of the hydraulic cylinder was defined as 500 mm, and the starting position for the system identification process was set at 250 mm. The data obtained were transferred to the Matlab/System Identification Toolbox (SIT) software, where the system model was created. Simulation studies showed that the highest model accuracy was achieved with a third-order state-space model, with 95.2% model prediction accuracy and 95.54% model fit.

Here, $\dot{x}$ (t) represents the system's state vector, u(t) denotes the input signal, and y(t) corresponds to the output variable. The model, provided in Equation 2 and Equation 3, was defined using experimental data and derived to be valid within a linear operating range.

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (2)$$
$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \quad (3)$$

In the third-order state-space model obtained using the Matlab/SIT, the "A" matrix represents the interactions between the hydraulic cylinder and its associated components, such as cylinder chamber pressure, piston position, and piston velocity. The "B" matrix describes how the input signal applied to the hydraulic proportional directional control valve influences the state variables. The matrices "A" and "B" for the model are provided in Equation 4.

$$A = \begin{bmatrix} 0.002 & 0.0983 & -0.2235 \\ -0.1674 & -83.3994 & 1.1828x10^{3} \\ -0.0492 & 22.7009 & -1.0873x10^{3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -2.3107x10^{-4} \\ 1.2604 \\ -1.4932 \end{bmatrix} \quad (4)$$

In the state-space model, the "C" matrix determines which state variables are measured and evaluated as the system output (e.g., piston position). The "D" matrix defines the effect that the input signal can have directly on the output, bypassing the state variables. In many hydraulic systems, the "D" value is typically zero or very small because the immediate effect of the input is primarily reflected through the state variables. The "C" and "D" matrices for the model are provided in Equation 5.

$$C = [-9.6468x10^{4} \quad 2.3579 \quad -6.5201], \; D = 0 \quad (5)$$

The elements of the K matrix are determined by MATLAB/SIT to account for the disturbance effects acting on the hydraulic system during the modeling process. The values of the K matrix are provided in Equation 6. Its incorporation into the obtained system model is presented in Equation 7 and Equation 8.

$$K = \begin{bmatrix} -0.0061 \\ -8.4178 \\ 1.7921 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + K.e(t) \quad (7)$$
$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) + e(t) \quad (8)$$

A PI controller has been chosen for the precise control of the hydraulic system. The PI controller adapts to the dynamic characteristics of the hydraulic system, providing high accuracy in position control. The proportional gain "K_p" and integral gain "K_i" coefficients are used to optimize the system's stability and response speed. The "K_p" coefficient accelerates the system's response, minimizing the error between the reference signal and the actual system output. Increasing the proportional gain allows the system to respond more quickly, but excessively high "K_p" values may lead to instability. The "K_i" coefficient, on the other hand, eliminates the steady-state error component in the system response, enabling the system to reach the desired steady-state condition. The integral gain improves the long-term alignment of the system with the reference signal; however, excessively high "K_i" values may cause oscillations or slow stabilization in the system.

For the control of the hydraulic system, the PI controller parameters were determined using the third-order state-space model of the hydraulic system created in Simulink.

Initially, the PI controller parameters were set to K_p=0 and K_i=0, and the system's response was observed. Subsequently, the K_p and K_i parameters were gradually increased to optimize the closed-loop system's behavior. During the simulation process, the accuracy and stability of the hydraulic cylinder's position control were analyzed. The values of K_p=0.255 and K_i=0.15 obtained from the simulation environment were integrated into the real system. It was verified that the PI controller adapted to the dynamic characteristics of the hydraulic system and exhibited the desired performance.

2.5. FPGA based control software

In this study, the position control of the piston-type wave maker mechanical system, used to generate waves consisting of a single frequency and amplitude component, is achieved through a hydraulic cylinder system. A proportional directional control valve is employed for the position control of the hydraulic cylinder. The user provides the amplitude and frequency parameters of the hydraulic cylinder directly through a LabVIEW program developed for this purpose. The front panel interface of the wave channel control software developed in LabVIEW is shown in Figure 9. In the initial program, the Virtual Instrument (VI) operating on the computer directly transfers the hydraulic cylinder parameters to the FPGA target. If desired, the user can also control the LabVIEW program running on the FPGA target.

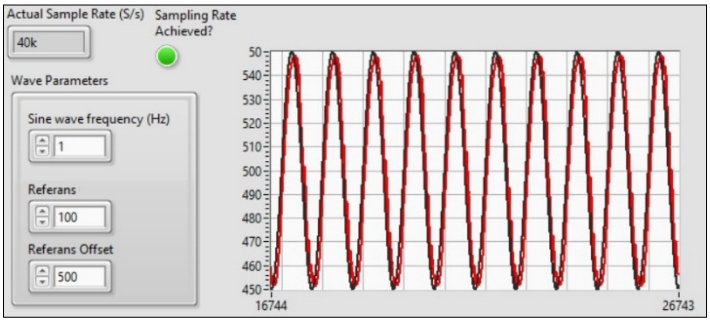


Figure 9. Labview interface developed for transferring the control parameters of the cylinder to the FPGA structure

The program panel (back panel) corresponding to the interface (front panel) shown in Figure 9 is presented in Figure 10.

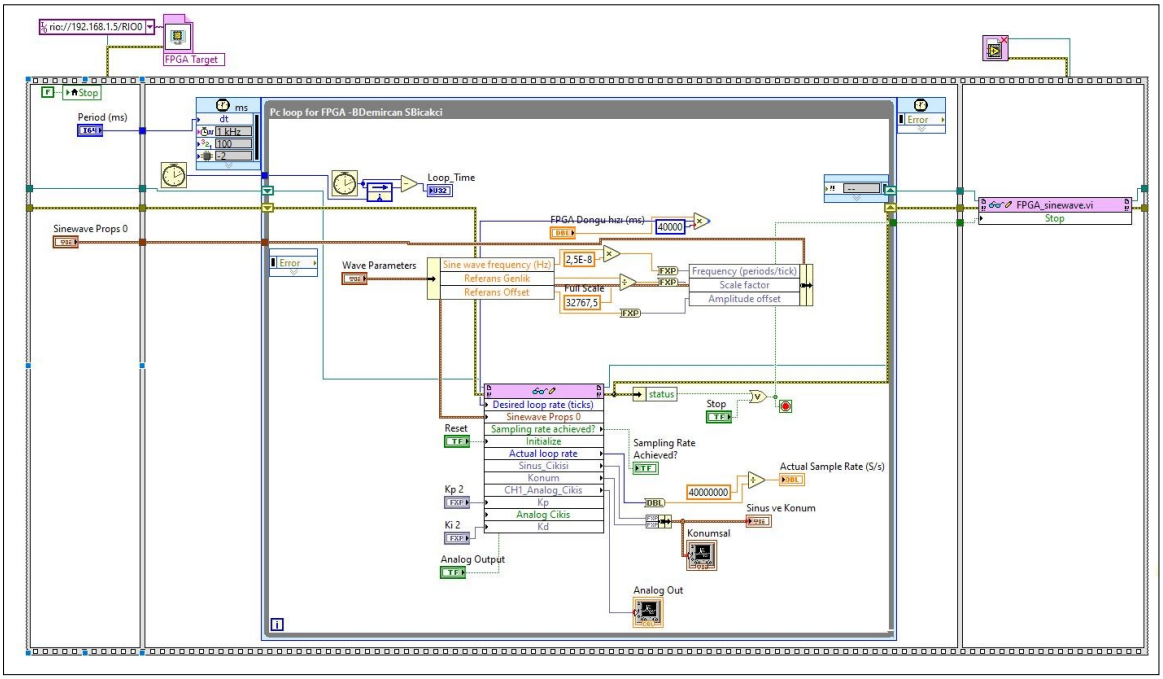


Figure 10. Labview interface developed for transferring the control parameters of the cylinder to the FPGA structure-back panel

The FPGA parameters provided by the user are directly transferred to the FPGA structure and can also be monitored by the user through the FPGA interface. The loop rate for wave generation in the developed LabVIEW software was set to 25 microseconds. Apart from the FPGA structure, the "scan engine" operating within the NI-CRIO 9074 hardware can run at a maximum loop rate of 1 millisecond. The LabVIEW software running directly on the FPGA is shown in Figure 11.

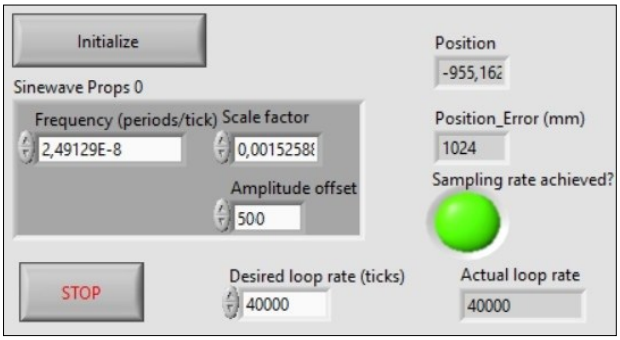


Figure 11. FPGA-based Labview program developed for the control of the piston type wave maker

Similar to the LabVIEW structure on the computer side, the LabVIEW program running on the FPGA also includes a back panel and a front panel. The back panel corresponding to the front panel shown in Figure 11 is presented in Figure 12.

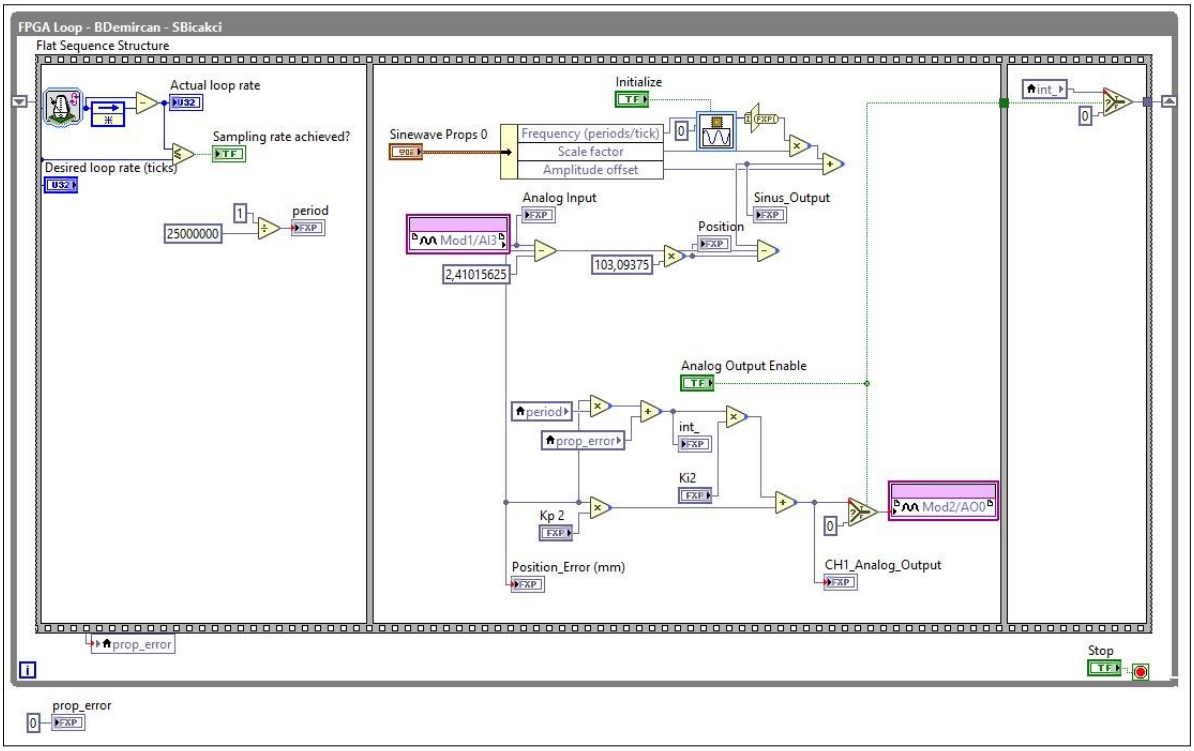


Figure 12. FPGA-based Labview program developed for the control of the piston type wave maker-back panel

2.6. Wave measurement

Since the wave maker in the wave channel operates with a single amplitude and frequency component, the generated waves are in a regular form. In this case, no spectrum transformation was necessary, as the wave frequency matched the control signal frequency of the hydraulic cylinder. Therefore, it was sufficient to measure wave heights directly from the data obtained via wave measurement probes. Figure 13 shows the graph obtained from the first wave measurement probe sensor for waves generated by the wave maker under a 1 Hz control signal.

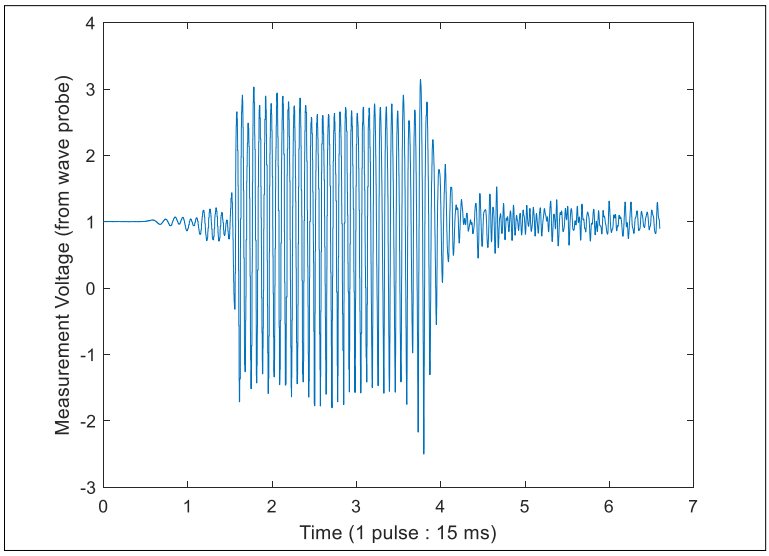


Figure 13. Wave measurement graph (Amplitude and Time)

Real-time wave measurements obtained from the first wave measurement probe sensor were analyzed using the Fast Fourier Transform (FFT) to determine the frequency information of the generated wave. The frequency spectrum of the signal after applying the FFT is shown in Figure 14.

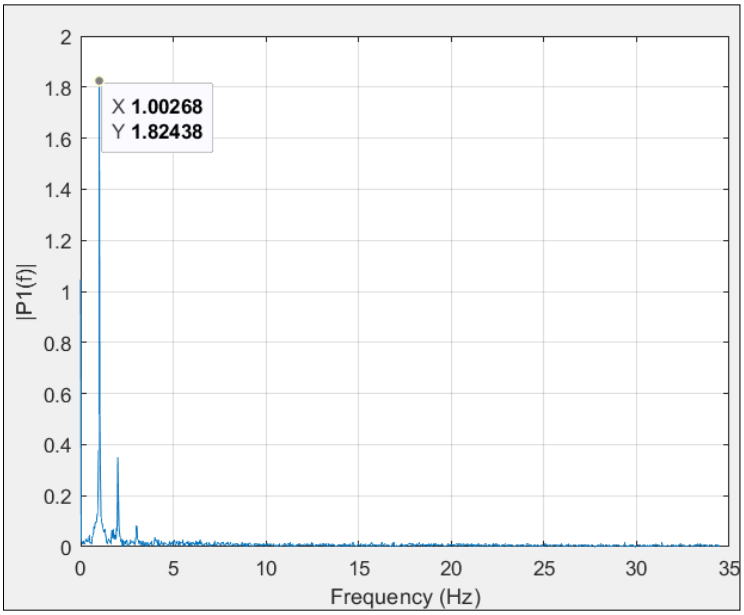


Figure 14. FFT graph of wave measurements

According to the FFT analysis results, the frequency of the wave profile generated under a 1 Hz control signal was measured as 1 Hz, matching the frequency of the control signal.

3. Results

The hydraulic cylinder system and the piston-type wave maker in the wave channel were controlled using the PI control method. According to the experiment presented in Table 2, the measurement results obtained from the sensor used for wave measurement, along with the hydraulic cylinder stroke values and constant water depth data, were recorded for a control signal frequency of 0.8 Hz.

Table 2. Wave Channel Experiment Results-I

Constant Water Level [*h*]-cm	**Hydraulic Cylinder Total Stroke [*S*(t)]-cm**	**Wave Height [*H*]-cm**	**Hydraulic Cylinder Frequency-Hz**
50	1.6	2.5	1
50	3.6	5	1
50	5.4	8	1
50	7.6	10	1
50	9.6	13	1
50	11.6	16	1
60	1.6	2.9	1
60	3.6	5	1

Table 2. Wave Channel Experiment Results-I

Constant Water Level [*h*]-cm	**Hydraulic Cylinder Total Stroke [*S*(t)]-cm**	**Wave Height [*H*]-cm**	**Hydraulic Cylinder Frequency-Hz**
60	5.4	8	1
60	7.6	11	1
60	9.6	15	1
60	11.6	17	1

Table 3. Wave Channel Experiment Results-II

Constant Water Level [*h*]-cm	**Hydraulic Cylinder Total Stroke [*S*(t)]-cm**	**Wave Height [*H*]-cm**	**Hydraulic Cylinder Frequency-Hz**
50	1.6	1	0.8
50	3.6	3	0.8
50	5.4	5	0.8
50	7.6	7	0.8
50	9.6	8	0.8
50	11.6	11	0.8
60	1.6	1.6	0.8
60	3.6	4	0.8
60	5.4	5.7	0.8
60	7.6	8	0.8
60	9.6	11	0.8
60	11.6	12	0.8

The hydraulic cylinder system and piston-type wave maker in the wave channel were controlled using the PI control method. According to the experiment presented in Table 2, the measurement results obtained from the sensor used for wave measurement were provided for a control signal frequency of 0.8 Hz, along with the hydraulic cylinder stroke values and constant water depth data.

Tables 2 and 3 summarize the effects of the total stroke of the hydraulic cylinder (ranging from 1.6 cm to 11.6 cm) and cylinder frequency (1 Hz or 0.8 Hz) on the resulting wave height under constant water depths (50 cm or 60 cm) in the wave channel. Based on the results:

Effect of Stroke Increase: As the hydraulic cylinder stroke increases, the generated wave height systematically rises. For instance, at a water depth of 50 cm and a frequency of 1 Hz, a stroke of 1.6 cm produces a wave height of approximately 2.5 cm, whereas increasing the stroke to 11.6 mm raises the wave height to 16 cm. Similarly, at a depth of 60 cm and a frequency of 1 Hz, the wave height increases from 2.9 cm at 1.6 cm stroke to 17 cm at 11.6 cm stroke.

Effect of Water Depth: Comparing water depths of 50 cm and 60 cm reveals that, for the same stroke and frequency values, wave heights are generally slightly higher at 60 cm depth. For example, at 1 Hz frequency and 5.6 cm stroke, a wave height of 8 cm is achieved at 50 cm depth, while a height of 8.1 cm or higher is observed at 60 cm depth.

Effect of Frequency (0.8 Hz vs. 1 Hz): As shown in Table 3, reducing the frequency to 0.8 Hz results in wave heights that are comparatively lower than those generated at 1 Hz for similar stroke values. For example, at a depth of 50 cm and a stroke of 5.6 cm, a wave height of 8 cm is achieved at 1 Hz, whereas a height of approximately 5 cm is observed at 0.8 Hz.

Evaluation and Applications: The experimental results demonstrate that cylinder stroke and frequency are key determinants of wave formation. Higher stroke values and frequencies increase wave height, allowing for a broader range of desired wave parameters to be achieved. Although increasing water depth has a moderately positive effect on wave height, optimizing parameters such as channel length, water level, stroke range, and frequency collectively is necessary for efficient system operation. These findings provide a critical foundation for controlled wave generation in wave channels. In particular, evaluating these parameters together facilitates more accurate predictions of wave behavior, which is essential for testing wave energy converters under varying conditions or designing coastal and offshore structures.

4. Conclusion and discussion

In this study, a hydraulically controlled piston-type wave generator was successfully implemented in a 24 m × 1 m × 1 m wave channel using the NI-CRIO 9074 PAC equipped with FPGA hardware. The experimental results demonstrated that adjusting the hydraulic cylinder stroke and actuation frequency allowed for the generation of regular waves over a wide range of amplitudes. Specifically, increasing the cylinder stroke systematically elevated the wave height, while variations in water depth (50 cm and 60 cm) and frequency (1 Hz and 0.8 Hz) significantly influenced wave formation. These findings confirm that optimizing key parameters such as stroke, frequency, and water depth is essential for achieving the desired wave characteristics and minimizing wave reflections within the channel.

Additionally, the FPGA-based control approach enabled real-time and precise management of the hydraulic cylinder, ensuring stable wave production with minimal latency. Experimental data obtained via resistive wave probes placed at different locations along the channel verified that the generated waves closely matched the predicted input signals in terms of amplitude and frequency. This platform, therefore, provides a robust and flexible environment for evaluating wave-structure interactions in areas such as wave energy converters, coastal defense systems, and offshore platforms.

Overall, this study highlights the importance of advanced real-time control strategies, such as FPGA-based architectures, in improving wave channel experiments. Future research could focus on employing more sophisticated or adaptive control algorithms, such as model predictive or machine learning-based controllers, to enhance wave quality and expand the range of operational conditions. By integrating these advancements, wave

channels can become even more powerful experimental platforms for both fundamental scientific research and the development of practical marine renewable energy technologies.

References

[1] M. A. Zullah, D. Prasad, M. R. Ahmed, and Y. H. Lee, Performance analysis of a wave energy converter using numerical simulation technique, ***Science China Technological Sciences***, vol. 53, no. 1, pp. 13–18, Jan. 2010. doi: 10.1007/S11431-010-0026-3.

[2] Q. Du and D. Y. C. Leung, 2D Numerical Simulation of Ocean Waves, ***Proceedings of the World Renewable Energy Congress***, 8–13 May 2011, Linköping, Sweden, vol. 57, pp. 2183–2189, Nov. 2011. doi: 10.3384/ECP110572183.

[3] H. Gao and B. Li, Establishment of Motion Model for Wave Capture Buoy and Research on Hydrodynamic Performance of Floating-Type Wave Energy Converter, ***Polish Maritime Research,*** vol. 22, no. s1, pp. 106–111, Sep. 2015. doi: 10.1515/POMR-2015-0041.

[4] G. Rajapakse, S. Jayasinghe, and A. Fleming, Power Smoothing and Energy Storage Sizing of Vented Oscillating Water Column Wave Energy Converter Arrays, ***Energies***, vol. 13, no. 5, p. 1278, Mar. 2020. doi: 10.3390/EN13051278.

[5] G. Giannini, P. Rosa-Santos, V. Ramos, and F. Taveira-Pinto, On the Development of an Offshore Version of the CECO Wave Energy Converter, ***Energies***, vol. 13, no. 5, p. 1036, Feb. 2020. doi: 10.3390/EN13051036.

[6] M. A. Jusoh, M. Z. Ibrahim, M. Z. Daud, A. Albani, and Z. M. Yusop, Hydraulic Power Take-Off Concepts for Wave Energy Conversion System: A Review, ***Energies***, vol. 12, no. 23, p. 4510, Nov. 2019. doi: 10.3390/EN12234510.

[7] A. Maria-Arenas, A. J. Garrido, E. Rusu, and I. Garrido, Control Strategies Applied to Wave Energy Converters: State of the Art, ***Energies***, vol. 12, no. 16, p. 3115, Aug. 2019. doi: 10.3390/EN12163115.

[8] H. Carreno-Luengo and A. Camps, Empirical Results of a Surface-Level GNSS-R Experiment in a Wave Channel, ***Remote Sensing***, vol. 7, no. 6, pp. 7471–7493, Jun. 2015. doi: 10.3390/RS70607471.

[9] I. Gyongy, J.-B. Richon, T. Vruce, and I. Bryden, Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza, ***Physical Processes***, Technomics Press, pp. 343–354, 2013. doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.

[10] T. Kawaguchi, K. Nakano, S. Miyajima, and T. Arikawa, A Theory for Wave Energy Conversion by Bottom-Mounted Oscillating Bodies, (2024). https://www.researchgate.net/publication/334031823_A_Theory_for_Wave_Energy_Conversion_by_Bottom-Mounted_Oscillating_Bodies, (07.01.2025).

[11] B. Chenari, S. S. Saadatian, and A. D. Ferreira, Numerical Modelling of Regular Waves Propagation and Breaking Using Waves2Foam, ***Journal of Clean Energy Technologies***, vol. 3, no. 4, pp. 276–281, 2015. doi: 10.7763/JOCET.2015.V3.208.

[12] M. Renganathan and M. Hossain, Numerical Analysis of a Horizontal Pressure Differential Wave Energy Converter, ***Energies,*** vol. 15, no. 20, p. 7513, Oct. 2022. doi: 10.3390/EN15207513.

[13] X. Tian, Q. Wang, G. Liu, W. Deng, and Z. Gao, Numerical and experimental studies on a three-dimensional numerical wave tank, ***IEEE Access***, vol. 6, pp. 6585–6593, Jan. 2018. doi: 10.1109/access.2018.2794064.

[14] M. Y. Khalid, Laboratory Experiments on Water Wave Generation, PhD Thesis, University of Dundee, United Kingdom, (2020).

[15] M. Beneduce, Design of a Wavemaker for the Water Tank at the Politecnico di Torino, Maser Thesis, Politecnico Di Torino, Italy, (2018).

[16] L. F. Su, A. F. Zhang, and X. Liang, Research of the Servo Motion Control of Wave Maker, ***Applied Mechanics and Materials***, vol. 541–542, pp. 1243–1247, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.541-542.1243. (07.01.2025).

[17] Y. Jian-jun, D. Duo-tao, J. Gui-lin, and L. Sheng, High Precision Position Control of Electro-Hydraulic Servo System Based on Feed-Forward Compensation, (2024). https://www.researchgate.net/publication/289452217_High_Precision_Position_Control_of_Electro-Hydraulic_Servo_System_Based_on_Feed-Forward_Compensation, (07.01.2025).

[18] T. G. Ling, M. F. Rahmat, and A. R. Husain, System identification and control of an Electro-Hydraulic Actuator system, ***Proceedings - 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications***, pp. 85–88, 2012. doi: 10.1109/CSPA.2012.6194696.

[19] M. S. Mahdi, Controlling a Nonlinear Servo Hydraulic System Using PID Controller with a Genetic Algorithm Tool, (2024). https://www.researchgate.net/publication/311536154_Controlling_a_Nonlinear_Servo_Hydraulic_System_Using_PID_Controller_with_a_Genetic_Algorithm_Tool, (07.01.2025).

[20] Emerson, LabVIEW for CompactRIO Developer's Guide - NI., (2024). https://www.ni.com, (07.01.2025).

DOI:10.25092/baunfbed. 1620285 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 537-558, (2025)*

Betonarme binaların deprem performanslarının hızlı değerlendirilmesi için P25 metodunun geliştirilmesi ve Balıkesir uygulaması

Barış ÖZKUL[1,*], Atılay KAYA[2]

[1]*Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir.*
[2]*Balıkesir Büyükşehir Belediyesi, Fen İşleri Daire Başkanlığı, Balıkesir.*

Geliş Tarihi (Received Date): 15.01.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 25.03.2025

Öz

Ülkemizdeki yapı stokunun büyük bir bölümünün, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği koşullarını sağlamadığı, dolayısıyla da can güvenliğini sağlayamadığı bilinmektedir. Binaların deprem etkisi altında çökme ihtimalini tahmin etmek için, göz önüne alınan deprem yer hareketi düzeyinde bina davranışını temsil eden performans seviyesinin belirlenmesi gereklidir. Mevcut binaların, sismik performanslarının değerlendirilmesi süreci, uzun ve hesaplama açısından zahmetli bir çalışma gerektirir. Mevcut betonarme binaların hızlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için dünya çapında çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada hızlı değerlendirme yöntemleri kısaca özetlenmiş, P25 Hızlı Değerlendirme Yöntemi incelenmiştir. P25 Yönteminde, "Göreli kat ötelemelerini" de hesaba katan bir revizyon önerilerek deprem yönetmeliğine dayalı performans tahminlerine görece yakın tahminler elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, binaları hasar düzeyine bakılmaksızın tamamen "göçer" veya "göçmez" şeklinde sınıflandırarak P25 sonucuna göre daha net bir sonuç elde edilmeye çalışılmış, böylece orijinal yöntemde belirsiz (gri) alan olarak ifade edilen kavram kaldırılmıştır. Bu şekilde elde edilen sonuçlar ile mevcut betonarme yapıların hızlı değerlendirme metotları ile kategorize edilmesinin daha net şekilde yapılması ve gelecek büyük bir deprem sırasında tamamen göçmesi muhtemel yapıların hızlı şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Sunulan çalışma ile ülkemizin her bölgesinde sıklıkla karşılaştığımız "depreme dayanıklı olmayan" yapıların deprem olmadan önce tespit edilip yıkılarak oluşabilecek muhtemel can kayıplarının önlenmesi için önceki araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalara katkı verilmesi amaçlanmıştır. Revize edilerek geliştirilen metot uygulanarak Balıkesir İlinde bulunan 63 adet betonarme binanın deprem performansları değerlendirilmiştir. Balıkesir'in iki merkez ilçesinde bulunan mevcut betonarme binalar incelenerek mahalleler bazında da karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: *Hızlı değerlendirme, P25 metodu, betonarme yapılar*

[*] Barış ÖZKUL, ozkul@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3039-3381
Atılay KAYA, atilaykaya35@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4933-0222

Development of the P25 method for the rapid seismic assessment of reinforced concrete buildings and its application in Balıkesir

Abstract

It is well known that a large part of the building stock in Turkey do not meet the requirements of the Turkish Building Earthquake Code, hence, they do not ensure the life safety. In order to estimate collapse risk of the buildings under earthquake excitation, it is necessary to determine the performance level that represents the predicted behaviour under considered earthquake ground motion level. The seismic performance evaluation processes of existing buildings require a long and computationally intensive work. Several methods have been developed worldwide in order to rapid and reliable assessment for the existing reinforced concrete buildings. Rapid assessment methods were briefly summarized and the P25 Rapid Assessment Method was examined within the scope of this study. It was aimed to propose revision for P25 Method, which also takes into account "Interstory Drifts" and obtain an estimations relatively close to the code based performance predictions. The study attempted to obtain a relatively clear result according to the P25 score by classifying the buildings as completely "will collapse" or "will not collapse" regardless of the damage level, thus the concept expressed as an indistinct (gray) area in the original method were removed. With the results thus obtained, it is aimed to categorize the existing reinforced concrete buildings more clearly through rapid assessment methods and to rapidly determine the buildings likely to collapse completely during the future strong earthquake. This study aims to contribute to the efforts conducted by the previous researchers for determining in advance the buildings that are not "earthquake-resistant" before an earthquake and prevent possible loss of life due to collapsed buildings. Such buildings are frequently encountered in all the regions of Turkey. The modified method was implemented to 63 Reinforced Concrete Buildings in Balıkesir Province and the buildings' seismic performances were evaluated. The reinforced concrete buildings located in the two central districts of Balıkesir were examined and a comparison was made on a neighborhood basis.

Keywords: *Rapid assessment, P25 method, reinforced cocrete buildings*

1. Giriş

Ülkemizin hızlı nüfus artışı ve şehir merkezlerine göç sebebiyle, konut tipi yapı üretimi, geçmiş yıllarda kontrolsüz ve hızlı şekilde gerçekleşmiştir. Üretim sürecindeki denetim tam anlamıyla uygulanamadığından; malzeme, tasarım ve işçilik konusunda kötü durum ortaya çıkmış ve meydana gelen her depremden sonra çok büyük zararlar görülmüştür. Bu durum, son 30 yılda gerçekleşen her büyük depremden sonra -ne yazık ki- net şekilde karşımıza çıkmıştır. Özellikle 1999 yılında yaşanan "Marmara" ve "Düzce" depremleri ve ardından 2023 yılında yaşanılan Kahramanmaraş depremlerinden sonra bu konudaki farkındalık artmış, deprem sırasında ve deprem meydana geldikten sonra yapılması gerekenler için çeşitli adımlar atılarak "Afet Yönetimi" adı verilen süreç ile ilgili çalışmalara hız verilmiştir. Ancak, olası bir depremde, deprem olmadan önce, yıkılma tehlikesi olan binalar sebebiyle oluşacak muhtemel can kayıplarının önüne geçilmesi

amacıyla yürütülmesi gereken ve "risk yönetimi" şeklinde ifade edilen çalışmaların yeterli düzeyde olmadığı net şekilde görülmektedir [1].

Bir yapının, bilimsel olarak göçme riskinin hesaplanabilmesi için, öncelikle malzeme ve zemin özelliklerinin tespiti ve ilgili datalar kullanılarak söz konusu yapının yazılım yardımı ile modellenerek dolgu duvarlarının katkısını da dikkate alabilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinin ya da itme analizinin yapılması gereklidir. Hâlihazırdaki yapı stokunun performansının tam olarak belirlenmesi oldukça zaman alıcı ve maliyetli olmaktadır. Örneğin; yalnızca İstanbul'da yer alan ve "güvensiz" olarak nitelendirilebilecek yapıların performanslarının belirlenip güçlendirme uygulamalarının yapılabilmesi için 25 yıl gibi uzun bir zamana ve 25 Milyar dolar gibi büyük bir bütçeye ihtiyaç duyulmaktadır [2]. Bina performans değerlendirmesi, bilgi ve bilimselliğin yanında tecrübe gerektiren de bir konudur. Bu sebeple, amaca yönelik olarak toptan göçecek yapıların hızlıca tespit edilerek deprem olmadan önce kontrollü şekilde yıkılabilmesi için binanın performans değerlendirmesini yapacak kullanıcıların kolaylıkla hâkim olabilecekleri, basit ve anlaşılır hızlı değerlendirme metotlarına ihtiyaç doğmuş, bu konu birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve yeni fikirler ortaya konmuştur.

Işık ve Kutanis [3] P25 metodu kullanarak, Bitlis'teki 94 adet betonarme yapıya hızlı değerlendirme uygulamışlar, inceledikleri yapıların yarısının göçme riski bulunmadığı, %46'sının daha ayrıntılı şekilde incelenmesi gerektiği ve %4'nün ise göçebileceğini belirlemişlerdir. Yapılan araştırmanın, Bitlis'in tamamına uygulanarak deprem riskinin azaltılmasının uygun olacağını ifade etmişlerdir.

Pardalopoulos vd. [4], binaların genel geometrik detaylarını dikkate alarak sismik performanslarının belirlenmesi ve çökmesi muhtemel olanlarının hızlı şekilde tasfiye edilmesi amacıyla kullanılabilecek bir hızlı değerlendirme metodu sunmuşlar ve 1999 Atina depreminde çöken iki adet betonarme yapıya uygulayarak doğruluğunu kontrol etmişlerdir. Bir araştırma zinciri şeklinde yürütülen çalışmaların ikinci aşamasında [5] geçmişte yaşanan büyük depremlerde farklı düzeylerde hasara uğramış yapılar dikkate alınarak yöntem daha da geliştirilmiş ve inşaat mühendisleri için hızlıca uygulanabilecek bir kılavuz şeklinde sunulmuştur.

Uğur vd. [6], Kentsel dönüşüm sürecindeki bazı uygulamalar sırasında ortaya çıkan problemlerle ilgili olarak oluşturulan "riskli bina tespit raporlarını" incelemişler, Tekirdağ'da meydana gelen bu problemler ile ilgili olarak çözüm önerilerinde bulunmuşlardır.

Işık vd. [7] 200 adet betonarme binanın risk değerlendirmesini, Kanada sismik tarama yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Böylelikle, olası bir depremde ortaya çıkabilecek olası zararların azaltılması amacıyla Muş ilinde bulunan mevcut yapılar ile ilgili olarak bir arşiv oluşturulması amaçlanmıştır. Bu şekilde, inceledikleri yapıların %47'sini yüksek öncelikli ve %5'ini ise çok tehlikeli olarak kategorize etmişlerdir.

Gürbüz ve Tekin [8] olası bir depremde meydana gelebilecek muhtemel can kaybı ve hasar miktarını tahmin etmek amacıyla yeni bir metot üzerinde çalışmışlar, bu amaçla, doğrusal olmayan statik itme analizlerini 11 farklı tipteki betonarme yapıya uygulamışlardır. Araştırmacılar, bina gruplarına ait farklı hasarları ifade eden "kırılganlık eğrileri" düzenlemişlerdir. Analiz sonuçlarına istinaden oluşturulan eğriler,

muhtemel bir depremde, inceledikleri bina gruplarına benzer özellikteki yapılarda oluşabilecek hasarlara yakın şekilde oluşabileceğini ifade etmektedirler.

Türkel ve Tekeli [9], konut tipi betonarme yapıların, donatı akma dayanımları, beton basınç dayanımları ve etriye sıklaştırması verileri birer değişken olarak dikkate alınarak, yazılım ve yapısal modellemeye hiç ihtiyaç olmadan risk değerlendirmesi yapılabilmesi için 100 adet betonarme yapı incelemişlerdir. Söz konusu binaların çok büyük bölümünde beton dayanımının oldukça düşük olduğu, nervürsüz donatı kullanıldığı ve taşıyıcı elemanların mesnet bölgelerinde rijit düğüm noktası oluşturulmadığı ifade edilmiş, bu tür yapılarda birden fazla kusurun aynı anda bulunması durumunda yapının "Riskli bina" olarak tespit edilebileceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca kat adedine bağlı olarak yapıları sınıflandırarak etriye aralığının etkisi ve beton dayanımının düzeyinin risk tespitindeki önemli faktörler olduğunu, kat sayısı attıkça risk düzeyinin de yükseldiğini ifade etmişlerdir.

Kepenek vd. [10] Antalya körfezinde oluşabilecek muhtemel bir depremde afet riskini düşürmeye yönelik bir çalışma yürütmüşlerdir. Nüfus itibariyle, ülkemizin en yoğun 5. ili olan Antalya, iki bölgeye ayrılmış ve bu iki ana bölge de daha alt bölgelere ayrılmıştır. Bahse konu bölgelerde, 26610 adet 1 ila 7 kat arasında değişen betonarme binayı sokaktan tarama metodu ile incelemişler, belirledikleri alt bölgelerde daha ayrıntılı inceleme yaparak Antalya için bir sınır değer tespit etmişlerdir. Yürütülen "mikro bölgeleme" araştırması ile sınır değerin altında kalan bölgeler öncelikle değerlendirilmesi gereken alanlar olarak belirtilmiştir.

Erşahan vd. [11] Kahramanmaraş'ta, deprem performanslarını araştırdıkları 342 adet betonarme binayı, P25 metodu kullanarak incelemişler; bunlardan 100 adet binayı çok riskli, 121 binayı düşük riskli ve 121 binayı da ayrıntılı olarak incelenmesi gereken yapı olarak ifade etmişlerdir.

Yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesindeki ana hedef; muhtemel bir depremden önce gerekli araştırmaların yapılarak yeterli dayanıma sahip olmayan yapıların kontrollü şekilde yıkılması ya da depremde hedeflenen performans seviyesine ulaşabilmeleri için gereken güçlendirme uygulamalarına karar verilmesidir. Hâlihazırdaki yapıların deprem performanslarının belirlenmesi uzun ve oldukça zor bir süreçtir. Kullanımı devam eden her bir yapının, teker teker ve detaylı olarak araştırılarak performans seviyelerinin ortaya konulması neredeyse imkânsızdır. İfade edilen zorlukları da göz önüne alarak, gerçekleşmesi muhtemel büyük bir depremde meydana gelebilecek can kayıplarının önüne geçmek amacıyla yapılar için hızlı değerlendirme metotları geliştirilmiştir. Hızlı değerlendirme yöntemlerinde amaç; yapıları bir öncelik sıralaması olacak şekilde kategorize etmektir. Meydana gelebilecek bir depremde, göçme ihtimali yüksek olan "riskli" binaları hızlı şekilde tespit ederek, oluşabilecek muhtemel can kayıplarının önüne geçmek, bu konuda yüzyıllarca çok büyük acılar yaşamış olan ülkemizin en önemli konularından biridir.

Hızlı değerlendirme metotları ile düşük riskli olarak belirlenen yapıların yönetmelik şartlarını sağlayıp sağlamadığına yönelik net bir kanıya varmak elbette mümkün değildir. Yukarıda belirtildiği üzere, bu sadece ilk aşama değerlendirmedir. Dolayısıyla kesin sonuçlar, yalnızca ileri analiz metotları kullanılarak ortaya çıkmaktadır. Buradaki amaç, değerlendirmesi yapılan binalar arasında bir kategorizasyon oluşturmak ve yüksek risk barındıran yapıların öncelikle değerlendirilmesine imkân tanımaktır. İlgili yapının

gerekli görülmesi haline güçlendirilmesine ya da kontrollü şekilde yıkılarak yeniden tesisine öncelik vermek, can kayıplarının önlenmesinde hayati bir önem taşımaktadır. Bu sebeple, deprem riski bulunan şehirlerimizde hızlı değerlendirme uygulamalarının hızlıca hayata geçmesi son derece önemlidir.

2. Yöntem

Çalışmada P25 Hızlı Değerlendirme Yönteminde hesaba katılmayan "Göreli Kat Ötelemeleri" de dikkate alınarak P25 Metodunun geliştirilmesi ve gerçek performans düzeyine nispeten daha yakın bir sonucun elde edilmesi amaçlanmıştır. P25 hızlı değerlendirme yönteminde yer alan; "ayrıntılı incelenmesi gereken" gri bölge olarak ifade edilen kavramın sunulan çalışma ile ortadan kaldırılarak -elde edilen sonuç puanına göre- bina, tamamen "göçer" ya da hasar düzeyi gözetilmeksizin "göçmez" şeklinde net sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu şekilde elde edilen sonuçlar ile mevcut betonarme yapıların hızlı değerlendirme metotları ile kategorize edilmesinin daha net şekilde yapılması ve olası büyük bir depremde tamamen göçmesi muhtemel yapıların hızlı şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Sunulan çalışma ile ülkemizde çok sayıda bulunan "dayanımsız" yapıların deprem olmadan önce tespit edilip yıkılarak oluşabilecek muhtemel can kayıplarının önlenmesi için daha önce yapılan çalışmalara katkı verilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen yeni hesap metodu, Balıkesir İlinde bulunan 63 adet betonarme binaya uygulanarak deprem performansları incelenmiştir. Balıkesir'in iki merkez ilçesinde bulunan mevcut betonarme binalar incelenerek mahalleler bazında da karşılaştırma yapılmıştır.

3. Balıkesir'in depremselliği

Balıkesir, 12496 km²'lik yüz ölçümüne sahip, yoğun sismik aktivitenin yaşandığı tarihi öneme sahip bir şehirdir. Metamorfik kayaçlar, kireç taşı, dasit, kil, aglomera, andezit ve alüvyon tabakalarından oluşur; Kuzey Anadolu Fayı ve Ege Grabenleri etkisi altındadır [12].

Tarihsel olarak, Balıkesir kent merkezini etkileyen depremlerden en önemlisi; 29 Ocak 1898 tarihinde meydana gelen ve yerel olarak "Koca Zelzele" olarak ifade edilen depremdir. Bu depremde, Balıkesir merkezindeki yapıların büyük bölümünün yıkıldığı rapor edilmiştir [13]. Deprem kayıtları 1900 yılından sonra alınmaya başladığından, söz konusu depremin büyüklüğü bilinmemektedir ancak tarihi kayıtlar incelendiğinde son derece yıkıcı bir deprem olduğu görülmektedir. Yıkıcı deprem yaşanmadan bir kaç saat önce küçük bir öncü deprem olduğu için halk korku ile sokaklara çıkmış, bu sebeple asıl depremde can kaybı sayısı depremin büyüklüğüne oranla oldukça az olmuştur. Fakat binlerce insanın gözü önünde evleri yıkılmış, Balıkesir'deki tarihi binalar dâhil, hemen hemen hepsi bu depremden sonra inşa edilmiştir.

MTA tarafından yayınlanan Türkiye Aktif Fay Haritasında (Şekil 1), Balıkesir ve çevresindeki çeşitli aktif fay sistemleri görülmektedir. Balıkesir'de oluşan büyük depremlerden bazıları Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Balıkesir ve ilçelerinde meydana gelen büyük depremler.

Tarih	Yer	Şiddet	Mag(ms)	Can kaybı	Hasarlı Bina
18.11.1919	Ayvalık	X	7	3000	16000
04.01.1935	Erdek	VIII	6.4	5	600
15.11.1942	Bigadiç	VIII	6.1	16	2187
18.03.1953	Gönen	IX	7.2	265	6750
06.10.1964	Manyas	IX	7	23	5398

Şekil 1. Balıkesir ve çevresi fay haritası

4. Hızlı değerlendirme yöntemleri

Deprem, oldukça karmaşık ve belirsiz bir yer hareketi olduğundan dolayı yapılar üzerindeki etkisi çok fazla değişkene bağlıdır ve sarsıntı anındaki davranışının önceden belirlenmesi için görece kesin metotların uygulanması hem ekonomik olarak hem de sarf edilmesi gereken emek açısından oldukça zordur. Kullanıcıların can güvenliğinin sağlanması amacıyla deprem performanslarının araştırılması gereken yapıların oldukça fazla olması, yüksek maliyet ve uzun bir sürece ihtiyaç duyulması sebebiyle, mevcut yapı stokuna güvenilir bir kategorizasyon yapabilecek hızlı değerlendirme yöntemlerinin uygulanması ihtiyaçtan öte bir zorunluluk haline gelmiştir.

1968 yılında, Japonya'nın Tokachi-oki bölgesinde meydana gelen 8.3 büyüklüğündeki depremin ardından, hızlı değerlendirme yöntemleri ilk kez kullanılmıştır. Depremin hemen ardından, özellikle betonarme binalar çok büyük hasara uğramışlardır. 1968 yılında, Shiga, Shibata ve Takahashi'nin birlikte yaptıkları çalışmada, bahse konu depremden sonra oluşturulan datalar kullanılarak SST adlı bir metot geliştirilmiştir [14].

Bugüne kadar, ulusal ve uluslararası araştırmacılar bir çok hızlı değerlendirme metodu geliştirmişlerdir. Hepsinin ortak amacı, yapıların deprem performanslarının hızlı şekilde

değerlendirilebilmesi ve mevcut betonarme yapılar için hızlı bir kategorizasyon oluşturulabilmesidir. Hızlı Değerlendirme Yöntemlerinden en sık kullanılanlar;

- Japon Sismik İndeks Yöntemi
- Kanada Sismik Tarama Metodu
- Sokak Tarama Metodu – ATC 21, FEMA 154
- Kapasite İndeks Metodu
- Hızlı Durum Tespit Metodu - Durtes
- Kolon ve Duvar İndeksleri Metodu
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Hızlı Değerlendirme Metodu
- Bulanık Mantık Yaklaşımı
- PERA Metodu
- P25 Metodu

olarak sıralanabilir.

5. P25 Hızlı değerlendirme yöntemi

Riskli bina stokunu daha ekonomik ve hızlı şeklide kategorize ederek can güvenliğini tehdit eden yapıların belirlenmesi amacıyla Tezcan vd. [15] tarafından "Sıfır can kaybı projesi" adıyla bir proje başlatılmış ve bu proje bir araştırma süreci şeklinde devam etmiştir. Binaların, meydana gelebilecek büyük bir depremde, kat yığını halinde göçme ihtimalini ortaya koymak ve deprem meydana gelmeden önce kontrollü şekilde yıkılmasını ya da güçlendirilmesini sağlamak amacıyla ilk olarak "P5 Yöntemi", ardından Bal vd. tarafından "P24 Yöntemi" geliştirilmiş, son olarak aynı araştırmacılar tarafından "P25 Hızlı değerlendirme yöntemi" sunulmuştur [16].

Sunulan yöntemde, yapının zemin özellikleri, malzeme nitelikleri, yapısal düzensizlikleri, mevcut düşey taşıyıcı ve dolgu duvar boyutları ile yapı yüksekliği gibi değişkenler analiz edilerek "P1 Temel Yapısal Puanı" hesaplanır. Buna ek olarak, yapının farklı göçme modlarını dikkate alan toplam yedi yapısal puan belirlenir. Bu puanlar arasından, en yüksek riski temsil eden en küçük puan (Pmin) seçilir ve yapının bulunduğu bölgenin özelliklerine bağlı olarak bir "α-Düzeltme Çarpanı" ile çarpılarak topografik etkiler de değerlendirmeye dâhil edilir. Ayrıca, bu yedi puanın birbiriyle olan ilişkilerini ifade eden "β-Çarpanı" hesaplanır. Sonuçta, en küçük Pmin puanı, "β-Çarpanı" ve "α-Düzeltme Çarpanı" birleştirilerek "Psonuç" puanı elde edilir.

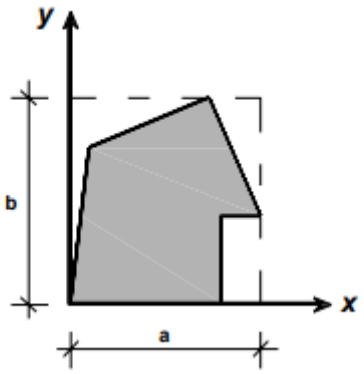
Bu "Psonuç" puanı, daha önce 311 betonarme bina üzerinde yapılan çalışmalarla kalibre edilmiş bir sisteme göre değerlendirilir. Elde edilen puanın üç farklı risk bölgesinden birine düşmesi durumunda yapının göçme riski belirlenir veya gerekirse daha ayrıntılı bir analiz yapılması gerektiği ifade edilir [3].

P25 yönteminin uygulanması için öncelikle yapıya ait kalıp planı olmalıdır. Yapının projenin bulunmaması durumunda mevcut binanın rölövesi çıkarılarak, bölme duvarlar ve taşıyıcı elemanların konum ve boyutlarının saptanması gerekmektedir. Yapılan değerlendirmelerde kritik kat belirlenerek, taşıyıcı elemanların proje ya da rölöveye uygunluğu kontrol edilmelidir [17].

5.1. Efektif kat alanı ve kritik kat seçimi

Binanın en uç kenarlarını baz alarak çizilen en küçük dikdörtgen; efektif kat alanıdır (Şekil 2). Deprem performansı hakkında fikir elde edilmek istenen binanın zemin kat planının oturduğu dikdörtgenin a ve b kenar uzunlukları belirlenir. Ardından, "Ae" efektif kat alanı ve her iki doğrultudaki Ix - Iy efektif kat atalet momentleri hesaplanır.

Kritik kat; binanın en ağır hasara maruz kalabileceği tahmin edilen kattır. Bodrum veya zemin katlar genelde en yüksek hasarın oluştuğu katlardır. Binanın bodrum katında boydan boya betonarme perdeler bulunmuyorsa kritik kat bodrum katlar olarak seçilebilir [18,19,20,21].



Şekil 2. Örnek bina zemin kat planı [18]

$$A_e = a.b \quad (1)$$

$$I_x = a^3.b/12 \qquad I_y = a.b^3/12 \quad (2)$$

Kritik katta bulunan etkili en kesit alanları yani her iki doğrultudaki dolgu duvarlar, kolonlar ve perdelerin alanları hesaplanır. Bunlardan yararlanarak C_{Ax} ve C_{Ay} alan endeksleri aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmaktadır;

$$C_{Ax} = 2.(10^5).A_{ef,x}/A_e \quad (3)$$

$$C_{Ay} = 2.(10^5).A_{ef,y}/A_e \quad (4)$$

$$A_{ef,x} = A_c + A_{sx} + (E_m/E_c).A_{wx} \quad (5a)$$

$$A_{ef,y} = A_c + A_{sy} + (E_m/E_c).A_{wy} \quad (5b)$$

$$C_{A,\,min} = \min(C_{Ax}, C_{Ay}) \quad (6a)$$

$$C_{A,\,maks} = \text{maks}(C_{Ax}, C_{Ay}) \quad (6b)$$

$$C_A = \sqrt{(0.87 . C_{A,min})^2 + (0.50 . C_{A,maks})^2} \quad (7)$$

Dolgu duvarı elastisite modülünün, beton elastisite modülüne oranı; $E_m / E_c = 0.15$'dir. Bu alan endekslerinin küçüğüne 'minimum', büyüğüne 'maksimum' bileşen gözü ile bakılarak CA – Alan Endeksi Bileşkesi için ağırlıklı bir ortalama endeks hesaplanır (Denk 6a-6b,7) [18].

5.2. C_I - Bileşke atalet momenti endeksi

Bileşke Atalet Momenti Endeksi (C_I), belirlenen kritik kat için hesaplanır. Bu hesap için x ve y doğrultularındaki perde ve kolon atalet momenti endeksleri (C_{Ix} ve C_{Iy}) hesaplanır:

$$C_{Ix}=2.(10^5).(I_{ef,x}/I_x)^{0.2} \quad (8)$$

$$C_{Iy}=2.(10^5).(I_{ef,y}/I_y)^{0.2} \quad (9)$$

$$I_{ef,x}=I_{cx}+I_{sx}+(E_m/E_c).I_{wx} \quad (10a)$$

$$I_{ef,y}=I_{cy}+I_{sy}+(E_m/E_c).I_{wy} \quad (10b)$$

$$C_{I,\ min}=\min(C_{Ix}\ ,\ C_{Iy}) \quad (11a)$$

$$C_{I,\ maks}=\text{maks}(C_{Ix}\ ,\ C_{Iy}) \quad (11b)$$

$$C_I=\sqrt{(0.87\ C_{I,min})^2+(0.50\ C_{I,maks})^2} \quad (12)$$

Burada;
I_{cx} ve I_{cy} : Kritik kat kolonlarının x ve y yönüne göre atalet momentleri toplamı,
I_{sx} ve I_{sy} : Kritik kat perdelerinin x ve y yönüne göre atalet momentleri toplamı,
I_{wx} ve I_{wy} : Kritik kat dolgu duvarlarının x ve y yönüne göre atalet momentleri toplamı,
C_I : Atalet momenti endeksinin bileşkesini göstermektedir.
C_A ve C_I alan ve atalet momenti endekslerinin bileşkeleri, depremin binanın zayıf yönüne 30° açı ile geldiği yaklaşımına dayanılarak hesaplanmaktadır [18].

5.3. P_0 –Taşıyıcı sistem puanı

Taşıyıcı sistem puanı (P_0), binanın taşıyıcı sistem özelliklerini yansıttığından aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_0=(C_A+C_I)/h_0 \quad (13)$$

Burada düzeltme çarpanı h_0, bina yüksekliği ile ilgilidir. h_0 çarpanı, aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$h_0=-0.6.H^2+39.6.H-13.4 \quad (14)$$

H, kritik kattan itibaren ölçülen bina toplam yüksekliğini ifade etmektedir.

(14) numaralı ifade, farklı yükseklik ve kat sayısına sahip binalar için yapılan analizlerin sonuçlarına dayanmaktadır. Örneğin, 15 m yükseklikte 5 katlı bir binada h_0 = 446, yükseklikte tek katlı bir binada h_0 = 100 ve 30 m yükseklikte 10 katlı bir binada h_0 = 635 değerini vermektedir. h_0 değerinin elde edilmesi amacıyla 27.000 civarında bina üretilmiş ve farklı tasarımlara sahip yapılar için hazırlanan bir bilgisayar programı ile elde edilen sonuçlar regresyon analizine tabi tutulmuştur. Yapılan analizler yardımı ile Denklem (14) elde edilmiştir (R^2 = 0.40) [19].

5.4. P_1–Temel yapısal puanı

Yapının P_0 ham puanı, belirli düzeltme katsayıları ile çarpılarak Temel Yapısal Puan (P_1) hesaplanır. Bu düzeltme katsayıları (f_i), yapının zemin ve temel tipi, malzeme özellikleri ve çeşitli düzensizliklerine göre belirlenir. (f_i) katsayılarının değerleri ve tanımları Tablo 2'de detaylı olarak verilmiştir.

P_1 *Temel Yapısal Puanı* (15) eşitliği ile hesaplanır:

$$P_1 = P_0\ (\prod_{i=1}^{14} f_i) \quad (15)$$

P1 temel yapısal puanın yanı sıra, *P2*-Kısa Kolon Puanı, *P3*-Yumuşak ve Zayıf Kat Puanı, *P4*-Çıkmalar ve Çerçeve Süreksizliği Puanı, *P5*-Çarpışma Puanı, *P6*-Sıvılaşma Potansiyeli Puanı, *P7*-Toprak Hareketleri puanları da hesaplanarak P_{min} puanı bulunur.

5.5. α – Düzeltme çarpanı

Göçme kriterlerini temsil eden *yedi adet* P_i göçme riski puanı arasından en küçüğü (en fazla risk temsil eden) seçilerek P_{min} puanını oluşturur. P_{min} minimum puanının binanın ve yapı alanının özelliklerine göre ayrıca bir "α – Düzeltme Çarpanı" ile düzeltilmesi gerekmektedir. α – Düzeltme çarpanı; topoğrafik konum katsayısı olan "t", bina önem katsayısı olan "I", efektif ivme katsayısı olan "A_0" ve hareketli yük çarpanı olan "n" göz önüne alınarak Denklem (16) yardımı ile hesaplanmaktadır;

$$\alpha = (1 / I)(1.4 – A_0)[\ 1 / (0.4n + 0.88)]\ t \qquad (16)$$

Tablo 2. Yapısal düzensizlik katsayıları (f_i) [18]

Katsayı	Tanım	Risk Seviyesi		
		Yok	**Az**	**Yüksek**
f_1	Burulma Düzensizlikleri	1.00	0.95	0.90
f_2	Döşeme Süreksizlikleri	1.00	0.95	0.90
f_3	Düşey Doğrultudaki Süreksizlikler	1.00	0.90	0.65-0.70
f_4	Kütle Düzensizliği	1.00	0.85	0.75
f_5	Korozyon Durumu	1.00	0.90	0.80
f_6	Ağır Cephe Yükleri	1.00	0.90	0.90
f_7	Asma Kat Mevcudiyeti (γ=Asma kat / Kat alanı)	0.90 $\gamma = 0$	0.95 $0 < \gamma < 0.25$	0.90 $\gamma \geq 0.25$
f_8	Katlarda Seviye Farkı veya Kısmi Bodrum	1.00	0.90	0.80
f_9	Beton kalitesi(1)	$f_9 = (f_c/20)^{0.5}$		
f_{10}	Zayıf Kolon-Kuvvetli Kiriş(2)	$f_{10}=\left[\left(I_x+I_y\right)/2.l_b\right]^{0.15} \leq 1.00$		
f_{11}	Etriye Sıklığı(3)	$f_{11}=0.60\leq(10/s)^{0.25}\leq 1.00$		
f_{12}	Zemin Sınıfı	1.00 (Z2, Z1 için)	0.95 (Z3 için)	0.90 (Z4 için)
f_{13}	Temel Tipi	1.00 (Radye Temel)	0.95 (Sürekli Temel)	0.80-0.90 (Tekil Temel)
f_{14}	Temel Derinliği	1.00 (4 m' den fazla)	0.95 (1 – 4 m arası)	0.90 (1 m' den az)

(1) f_c , binanın MPa cinsinden beton kalitesidir.
(2) l_b değeri, en çok tekrar eden kirişin (kritik kat) atalet momenti; I_x, ve I_y değerleri, kolonların ortalama boyutlarından elde edilen temsili kolonun (kritik kat) atalet momentidir.
(3) s, sarılma bölgesindeki -cm cinsinden- etriye aralığı.

Topoğrafik t katsayısının nominal değeri t=1.0'dir. Bu katsayı, incelenen binanın bir tepenin üstüne kurulu olması durumunda t=0.7 ve dik bir yamaçta kurulu olması durumunda ise t=0.85 değerini almaktadır.

Belirtilen katsayı belirlenirken, özellikle 1985 yılında Şili'de meydana gelen deprem sonrası USGS tarafından "*Canal Beagle"* bölgesinde yapılan artçı depremler göz önüne alınarak elde edilen ölçümler büyük etki etmiştir. Tamamen aynı şekilde inşa edilen yapılardan, tepe üzerinde sıralananların, düzlükte bulunanlara nazaran daha fazla hasar gördüğü tespit edilmiştir [22-23]. Fakat Şili depreminden sonra bir bölgede elde edilen sonuçların her yere aynı şekilde kullanılamayacağı da açıktır. Ayrıca, topografik büyütmenin frekansa bağlı olarak değişmesi, yapılan ölçümlerin artçı depremlerden elde edilen kayıtlar olması gibi birçok belirsizlik bu parametrenin oldukça karmaşık hale gelmesine sebep olmaktadır. Ancak, yukarıda bahsedilen çalışmalardaki topografik etkinin en azından sözel tarifi P25 yöntemine de ışık tutmuştur.

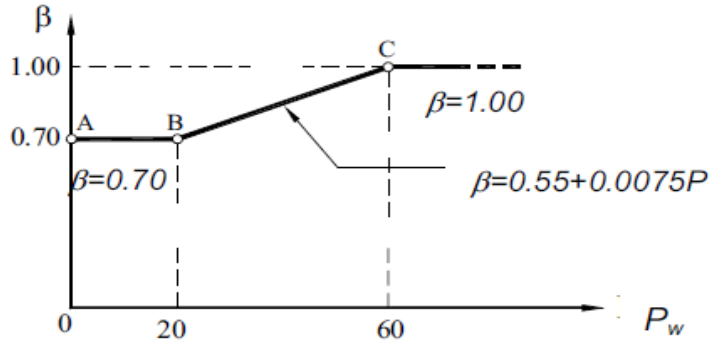
5.6. β - Düzeltme çarpanı

Daha önce hesaplanan yedi adet P_i puanının ağırlıklı olarak birbirleri ile etkileşimleri sonucunda, binanın sonuç performans puanı "P" belirlenmektedir. Bunun için önce P_i puanlarından minimum değer seçilerek P_{min} en küçük puan belirlenir ve ağırlık katsayısı olarak w = 4 ile çarpılır. Diğer P_i puanları Tablo 3'de gösterilen ağırlık puanları ile çarpılarak Denklem (17) yardımı ile ağırlıklı ortalama puanı P_w hesaplanır. Ağırlıklı ortalama puanı P_w kullanılarak Şekil 3'den bir *β – Düzeltme Çarpanı* elde edilir.

Tablo 3 - Pi puanları için Bal vd. [18] önerilen ağırlık oranları

Ağırlıklı Puan	**-P_1-**	**-P_2-**	**-P_3-**	**-P_4-**	**-P_5-**	**-P_6-**	**-P_7-**	**-P_{min}-**
w	4	1	3	2	1	3	2	4

$$P_w = \Sigma(w_i P_i) / \Sigma w_i \quad (17)$$



Şekil 3. β katsayısının değişimi [18]

5.7. $P_{sonuç}$ puanı

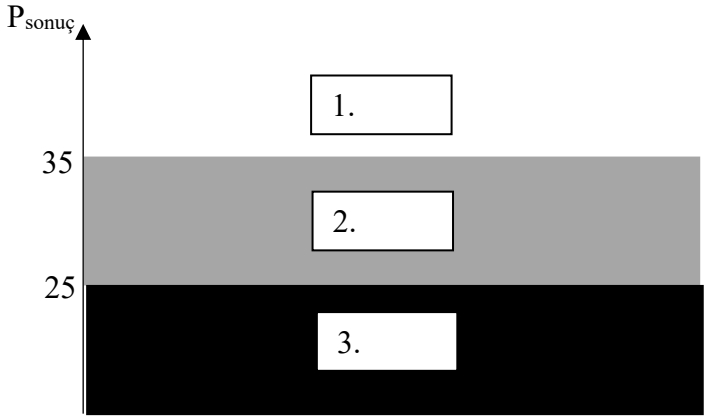
α ve β düzeltme çarpanları yardımı ile binanın performansını ifade eden $P_{sonuç}$ puanı:

$$P_{sonuç} = \alpha \beta P_{min} \quad (18)$$

olarak hesaplanır. Burada P_{min} birbirinden bağımsız hesaplanan ve yukarda açıklanan 7 adet P_i değerlendirme puanlarının en küçüğüne karşılık gelmektedir.
Sonuç olarak, belirlenen $P_{sonuç}$ *puanı* ile binanın toptan göçme riskinin ne düzeyde olduğu belirlenebilmekte ve daha ayrıntılı bir araştırmanın gerekliliği hakkında bir elde edilebilmektedir.

5.8. Bant genişliği tanımı

P25 yöntemi ile hızlı performans değerlendirmesi yapılan yapılar, elde edilen $P_{Sonuç}$ puanına bağlı olarak Şekil 4'te görüldüğü gibi 3 ayrı bölgede tanımlanmaktadır.



Şekil 4 - P25 yöntemi puan bölgeleri

1.Bölge (Düşük risk bandı P ≥ 35): Toptan göçme ihtimalinin az olduğu, can kaybı ihtimalinin çok düşük olduğu bölge olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla, ayrıntılı incelenmenin acil olmadığını ifade eden bölgedir. Şekilde yer alan, 2. ve 3. bölgelere göre daha hafif hasar alacağı tahmin edilen binaların yer alacağı varsayılan bölgedir. Bu bölgedeki yapıların muhtemel bir depremde maruz kalacağı hasar miktarını önceden hesaplamak elbette mümkün değildir. Fakat tamamen göçme ihtimalinin en düşük düzeyde kaldığı binaların bulunduğu alan olarak tanımlanması mümkündür.

2. Bölge (Ayrıntılı inceleme bandı 35 > P > 25): "Göçerek can kaybına sebep olacağı net şekilde belirlenemediğinden, ifade edilen belirsizliklerle ilgili daha ayrıntılı araştırmaya ihtiyaç duyulan yapıların bulunduğu bölge" olarak tanımlanabilir. Bu alanda konumlanan binalar için ancak ayrıntılı bir analize tabi tutulmak suretiyle deprem performansları hakkında bir fikir yürütülebilir.

3. Bölge (Yüksek risk bandı P ≤ 25): "Göçerek can kaybına sebep olabileceği, ayrıntılı bir incelemeye gerek olmadan söylenebilecek yapılar" bu bölgede yer almaktadır. Acilen boşaltılması ve güçlendirilmesi ya da kontrollü şekilde yıkılması gereken, en riskli binalar bu alanda yer almaktadır.

6. P25 metodu için önerilen revizyon

Çalışmanın bu bölümünde, P25 hızlı değerlendirme yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. P25 yöntemi, sunulan çalışmada revize edilmiş ve yöntemin adı yazarların soyadlarının ilk iki harfi olan P25 ÖZ-KA şeklinde ifade edilmiştir.

Mevcut binalar P25 Metodu ile değerlendirilirken statik analizler uygulanmaz ve bu nedenle deplasman değerlerine ulaşılamaz. Ancak, gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde yapıların statik analizlerini hızlı ve çok düşük maliyetlerle yapmak mümkündür. Dolayısıyla, binanın deprem performansını belirlemeye çalışırken yapının statik analizini yapmak, hızlı değerlendirme uygulamasına aykırı bir yaklaşım değildir ve yapı bilgisayarda hızlıca tanımlanarak deplasmanları kolayca hesaplanabilir. P25 Metodunda, yapının projeleri mevcut durumdadır veya mevcut olmayan yapılar için taşıyıcı sistemlerin rölövesi hazırlanmıştır. Hızlı değerlendirme yapılacak betonarme bir yapının mevcut projesini bir statik analiz programına aktarmak ve çözümlemek oldukça kolay, hızlı ve düşük maliyetlidir. Bu nedenle, değerlendirilecek yapının deplasmanları ve göreli kat ötelemeleri gibi mühendisler için kritik olan verilerin de kullanılması, P25 Metodunun kapsamını genişletip doğruluğunu artıracaktır. 2018 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde elde edilen göreli kat ötelemelerine bağlı olarak belirlenen hasar düzeylerinin ortaya konması oldukça uzun ve ayrıntılı hesaplamalar gerektirdiğinden yapıların bu kapsamdaki kurallardan faydalanılarak değerlendirilmeleri hızlı değerlendirme mantığı ile örtüşmemektedir. Bu sebeple, incelenen yapıların statik hesabı yapıldıktan sonra elde edilen deplasmanlar ve göreli kat ötelemelerine bağlı hasar düzeylerinin belirlenmesi için bir önceki yönetmelik olan DBYBHY 2007'den yararlanılmıştır. Bu yaklaşım daha önce ortaya atılan hızlı değerlendirme metotlarında da kullanılmıştır. Örneğin, Kanada Sismik İndeks Metodunda [24], dikkate alınan parametrelerin çoğu yapının inşa edildiği ve değerlendirmenin yapıldığı yıllara ve ayrıca Kanada'da yayınlanan 1965-1970 ve 1985 yönetmeliklerine bağlı olarak farklı puanlar almaktadır.

Önerdiğimiz revizyonda, yapının statik analizi sonrasında elde edilen rölatif kat ötelemelerine dayanarak, P25 yöntemine ek bir "Deplasman Puanı (P_{DEP})" tanımlanmaktadır. "Deplasman Puanı (P_{DEP})" tıpkı Japon Sismik İndeks Yönteminde kullanılan kullanım katsayısı (U) gibi, P25 yönteminden elde edilen sonuç puanıyla çarpılarak mühendislerin daha kesin bir değerlendirme yapması hedeflenmiştir (Şekil 5). P25 yöntemindeki gri (belirsiz) bölgeyi ortadan kaldırırken, can güvenliğini sağlamak amacıyla güvenli tarafta kalınmıştır. Statik analizle elde edilen rölatif kat ötelemelerine göre Tablo 4'te belirlenen "Deplasman Puanı (P_{DEP})" ve P25 yönteminden gelen puanın çarpımıyla elde edilen $P_{ÖZ\text{-}KA}$ sonuç puanı, her zaman P25 puanına eşit ya da daha düşük olacak şekilde tasarlanmıştır.

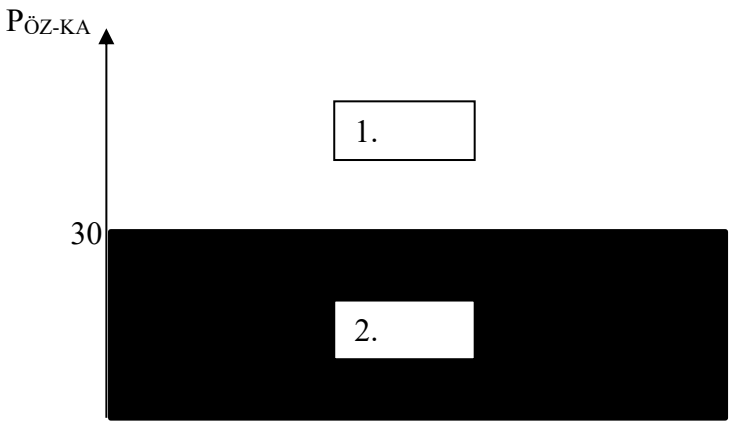
Bu revizyonda hesaplanan Deplasman Puanı (P_{DEP}), x ve y doğrultularında yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenen göreli kat öteleme değerlerinin mevcut puanı etkileyen olumsuz durumları dikkate alarak oluşturulmaktadır. Deprem performans değerlendirmesi hızlı bir şekilde yapılması gereken yapılar için P25 ÖZ-KA sonuç puanı ($P_{ÖZ\text{-}KA}$), statik analizle belirlenen hasar sınırlarına dayalı olarak değerlendirilir. Eğer yapı Minimum Hasar Bölgesi'nde (MN) bulunuyorsa, daha önce P25 yöntemiyle hesaplanmış olan puan, sonuç puanı olarak kabul edilir. Statik analiz, yapının Belirgin Hasar Bölgesi'nde (BH) olduğunu gösteriyorsa, P25 yöntemiyle hesaplanan puan %20 oranında düşürülerek P25 ÖZ-KA puanı elde edilir. Yapı, İleri Hasar Bölgesi'nde (İH) yer alıyorsa puan %40 ve Göçme Bölgesi'nde (GB) bulunuyorsa %60 oranında azaltılır. Böylece önerilen revizyon sayesinde, PÖZ-KA sonuç puanı her zaman kullanıcıların can güvenliğini önceliklendirecek şekilde güvenli bir yaklaşım sunmaktadır.

P25 yönteminde belirsiz kalan gri bölgedeki bant genişliği kavramı ortadan kaldırılarak yapılan değerlendirme sonucunda binanın alacağı sonuç puanına bağlı olarak net bir

sonuç ortaya konulması hedeflenmiştir. P25 yönteminde belirtilen bant genişliği tanımlarında bulunan belirsiz (gri) bölgenin bant aralığı 25 ila 35 değerleri arasında değişmektedir. Çalışmamızda, bahse konu gri renkle ifade edilen bölgenin ortadan kaldırılması için ve net bir sonuç elde edilmesi amacıyla P25 yönteminde önerilen "gri bölgenin" üst sınırı ve alt sınırının aritmetik ortalaması olan "30" sayısı belirlenmiştir. Bu revizyon ile elde oluşturulan $P_{ÖZ\text{-}KA}$ sonuç puanı, belirlenen sınır değere eşit ya da ondan büyük olması durumunda yapı "Göçmez", $P_{ÖZ\text{-}KA}$ sonuç puanı belirlenen 30 sınır değerinden küçük olması durumunda ise "Göçer" şeklinde net bir sonuç elde edilmektedir.

Tablo 4 - P25 ÖZ-KA sonuç puanlarının hesaplanması

		Hasar Bölgesi			
		MN < 0.01	0.01 < BH < 0.03	0.03 < İH < 0.04	0.04 < GB
P_{DEP} Puanı		P_{DEP} =1.00	P_{DEP} =0.80	P_{DEP} =0.60	P_{DEP} =0.40
$P_{ÖZ\text{-}KA}$	x yönü	$P25_{sonuç}$	$P25_{sonuç}$x0.80	$P25_{sonuç}$x0.60	$P25_{sonuç}$x0.40
	y yönü	$P25_{sonuç}$	$P25_{sonuç}$x0.80	$P25_{sonuç}$x0.60	$P25_{sonuç}$x0.40



7. Daha önceki çalışmalar ile karşılaştırma

TÜBİTAK 106-M-278 projesi [19] kapsamında mevcut yapıların puanları incelenmiş, önceki yüksek lisans tez çalışmaları ve projedeki yapılarla kıyaslanarak Tablo 5'te sunulmuştur.

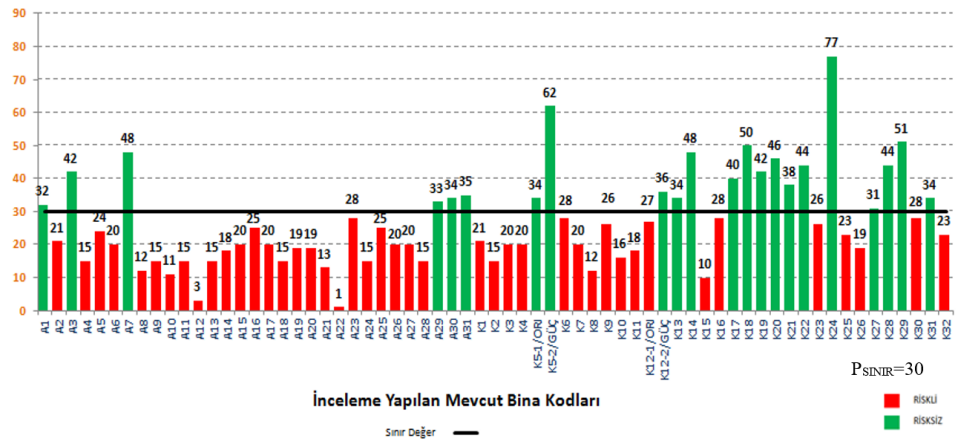
Daha önce yapılmış olan lisansüstü tez çalışmaları ve Tübitak projesinde incelenen yapılardan elde edilen puanlar ile bu çalışma kapsamında elde edilen puanlar Tablo 5'de gösterilmiş olup birbirlerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen revizyonda, can güvenliği sağlanacak şekilde, önceki çalışmalarda elde edilen puanlara eşit veya daha küçük puanlar ortaya çıkmaktadır [29].

Tablo 5 - P25 ÖZ-KA Revizyonu ile daha önce yapılmış çalışmaların karşılaştırılması

No	Referans	Yeri	Kat	İnşa Yılı	Önceki çalışmalarda Bulunan P25 Puanı	Hesaplanan P25 Puanı	Göreli Kat Öteleme Sınırı	P 25 ÖZ-KA Puanı ($P_{ÖZKA}$)
1	052ADA - M - 06 - MD [19]	Adana	B+5	-	53	52	İH	31
2	125IST - R - 03 - ND [19]	İstanbul	B+2	1988	10	15	İH	9
3	Örnek Yapı 1 [19]	-	6	-	20	18	BH	14
4	128 – IST – R – 6 - ND [19]	İstanbul	B+6	1975	38	35	İH	21
5	052ADA - M - 06 - MD [19]	Adana	B+5	-	47	50	İH	30
6	Doğan [25]	Düzce	B+2	1984	9,735	9	İH	5
7	Tural [26]	Düzce	B+5	-	20	20	İH	12
8	Altınel [27]	Kocaeli	Z+3	1995	50	50	BH	40
9	Gümüşbaş [28]	Örnek Yapı Çıkmasız	6	-	40	36	MH	36
10	Gümüşbaş [28]	Örnek Yapı Çıkmalı	6	-	26	25	GB	13

8. Önerilen revize yöntemin balıkesir ilindeki binalara uygulanması

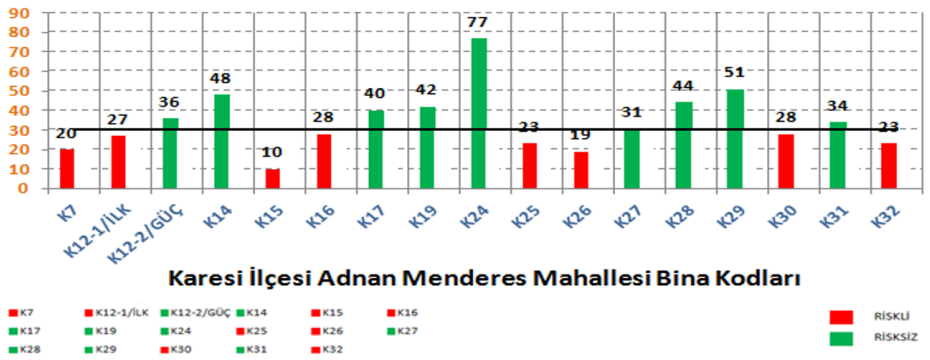
Çalışma kapsamında Balıkesir'in merkez iki ilçesi olan Karesi ve Altıeylül ilçelerinde, 1980 yılı ile 2011 yılları arasında inşa edilmiş betonarme binalarda inceleme yapılmış ve elde edilen sonuç puanları Şekil 6'da gösterilmiştir. Deprem performansları araştırılan binaların kat adetleri 3 ila 11 arasında değişim göstermektedir. 32 bina Karesi ilçesinde, 31 bina ise Altıeylül ilçesinde olmak üzere toplam 63 betonarme yapının deprem performansları hızlı değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Karesi ilçesinde incelenen yapılara verilen kod numaraları "K" harfi ile Altıeylül ilçesinde bulunan yapılara verilen kod numaraları ise "A" harfi ile başlamakta ve sıra numarasına göre listelenmektedir. Bu binaların bazılarına güçlendirme yapıldığı da tespit edilmiştir. Güçlendirilen yapıların rölöveleri oluşturulmuş ve güçlendirmeden önceki hallerinin projeleri ilgili kurumlardan temin edilmiştir. Bu şekilde, bahse konu yapıların güçlendirme uygulanmış hali ile orijinallerinin sonuçları da elde edilerek karşılaştırılmıştır.



Şekil 6 - Balıkesir'de incelenen betonarme binaların $P_{ÖZ-KA}$ puanları

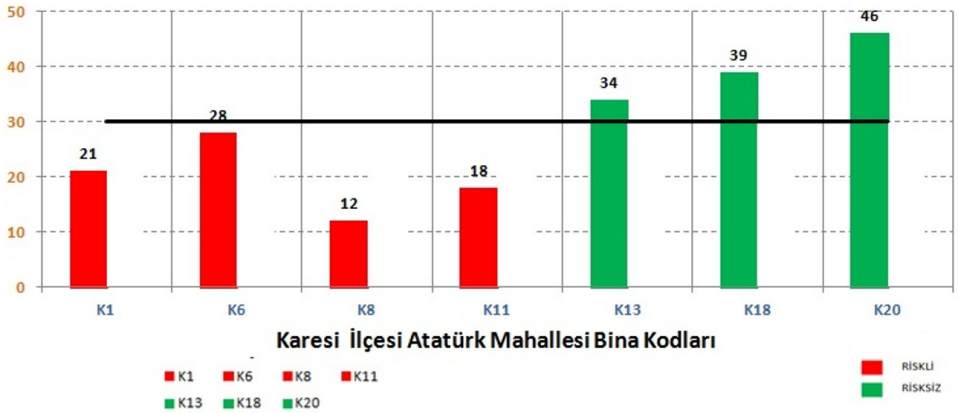
İncelenen yapılar, mahalle bazında gruplandırılarak zemin özelliklerini de göz önünde bulunduran genel bir değerlendirme yapılmıştır. Yapılar, Balıkesir'in Karesi ilçesinde; Atatürk Mahallesi, Adnan Menderes Mahallesi ve Paşaalanı Mahalleleri, Altıeylül ilçesinde ise, Plevne Mahallesi, Altıeylül Mahallesi, ve Bahçelievler Mahalleleri olmak üzere toplam 6 gruba ayrılmaktadır.

Karesi ilçesinde incelenen 32 adet binadan; zemin özellikleri bakımından diğer mahallelere oranla çok daha iyi durumda olan Adnan Menderes Mahallesindeki 16 adet yapı incelenmiş olup, Şekil 7'de görüldüğü gibi, bu mahallede incelenen binaların %50'si "Göçme Riski" olan yapı olarak belirlenmiştir.



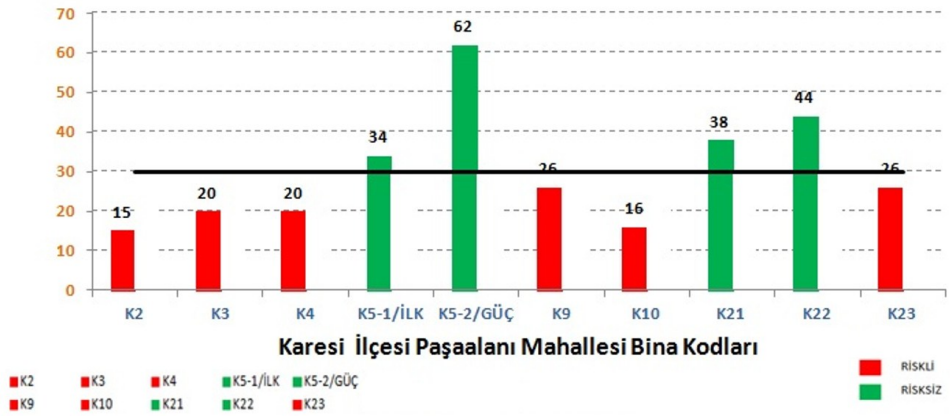
Şekil 7. Karesi İlçesi, Adnan Menderes Mahallesi'nde incelenen binaların $P_{ÖZ-KA}$ sonuç puanları

Karesi ilçesinde, araştırmanın yürütüldüğü mahalleler içerisindeki, zemin özellikleri bakımından orta düzey olarak değerlendirilebilecek Atatürk Mahallesi'nde, Şekil 8'de görüldüğü gibi 7 adet bina incelenmiş olup bu binaların %57'si "Göçme Riski" olan yapı olarak belirlenmiştir.



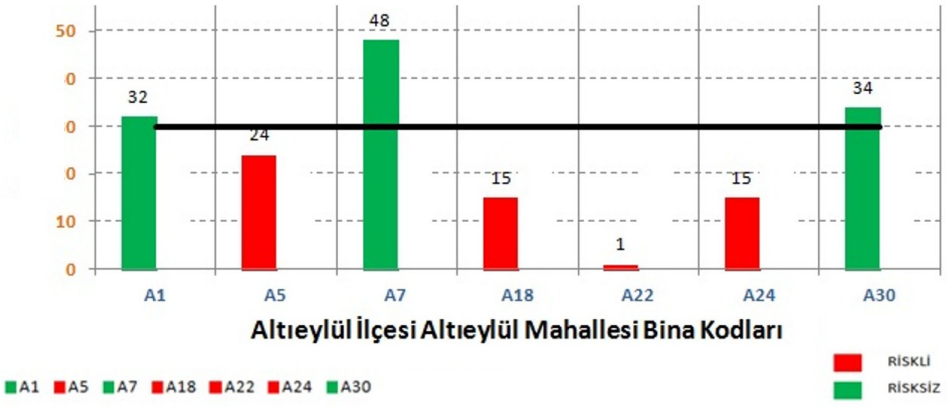
Şekil 8. Karesi İlçesi, Atatürk Mahallesi'nde incelenen binaların $P_{ÖZ-KA}$ sonuç puanları

Karesi ilçesinde, zemin özellikleri bakımından en kötü olarak değerlendirilebilecek Paşaalanı Mahallesinde Şekil 9'da görüldüğü gibi, incelenen 9 adet binanın %67'si "Göçme Riski" olan yapı olarak belirlenmiştir.



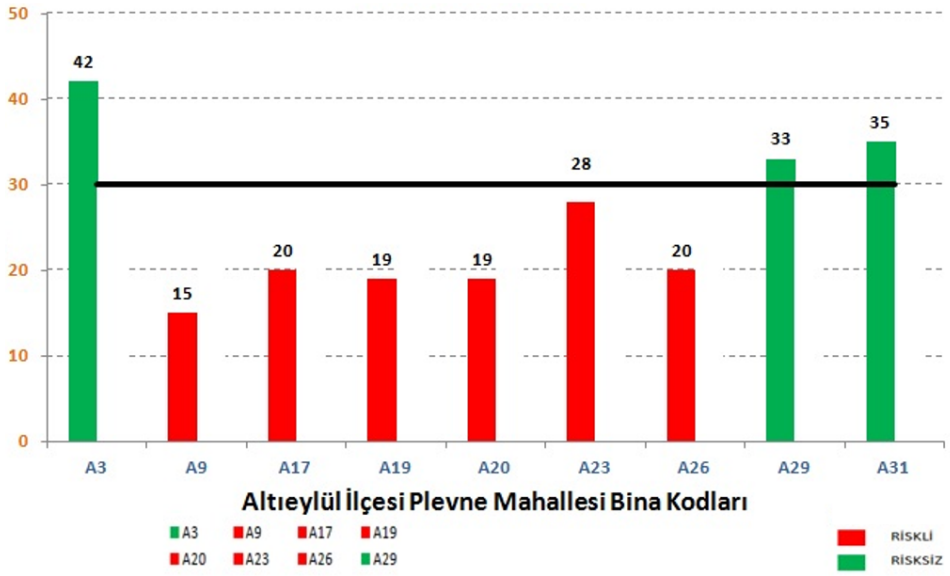
Şekil 9. Karesi İlçesi, Paşaalanı Mahallesi'nde incelenen binaların $P_{ÖZ-KA}$ sonuç puanları

Balıkesir'in Altıeylül ilçesinde yapılan değerlendirmedeki 31 adet betonarme yapıdan; zemin özellikleri diğer mahallelere oranla daha iyi olan, Altıeylül Mahallesi'nde incelenen 7 adet binanın %57'si Şekil 10'da görüldüğü gibi "Göçme Riski" olan yapı olarak belirlenmiştir.



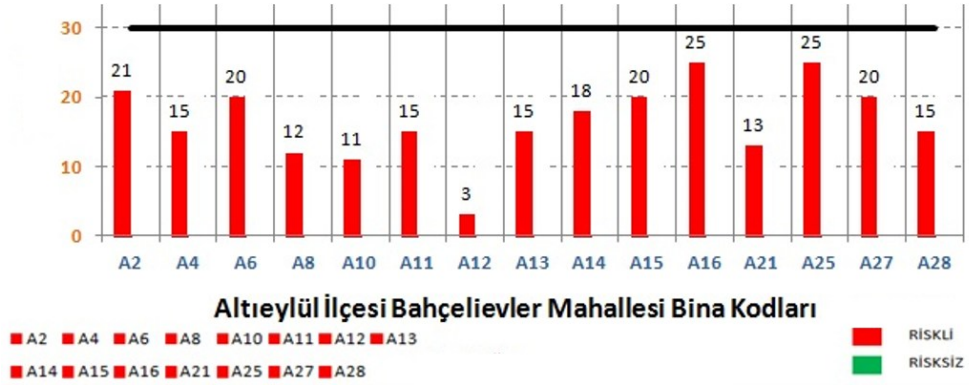
Şekil 10. Altıeylül İlçesi, Altıeylül Mahallesi'nde incelenen binaların $P_{ÖZ-KA}$ sonuç puanları

Altıeylül ilçesinde, zemin özellikleri bakımından orta düzey olarak değerlendirilebilecek Plevne Mahallesi'nde, Şekil 11'de görüldüğü gibi 9 adet bina incelenmiş olup bu binaların %67'si "Göçme Riski" olan yapı olarak belirlenmiştir.



Şekil 11. Altıeylül İlçesi, Plevne Mahallesi'nde incelenen binaların $P25_{ÖZ\text{-}KA}$ sonuç puanları

Altıeylül ilçesinde inceleme yapılan 31 adet binadan; zemin özellikleri bakımından diğerlerine oranla en kötü olarak nitelendirilebilecek olan Bahçelievler Mahallesinde Şekil 12'de görüldüğü gibi, 15 adet yapı incelenmiş ve bu binaların tamamı "Göçme Riski" olan yapı olarak belirlenmiştir.



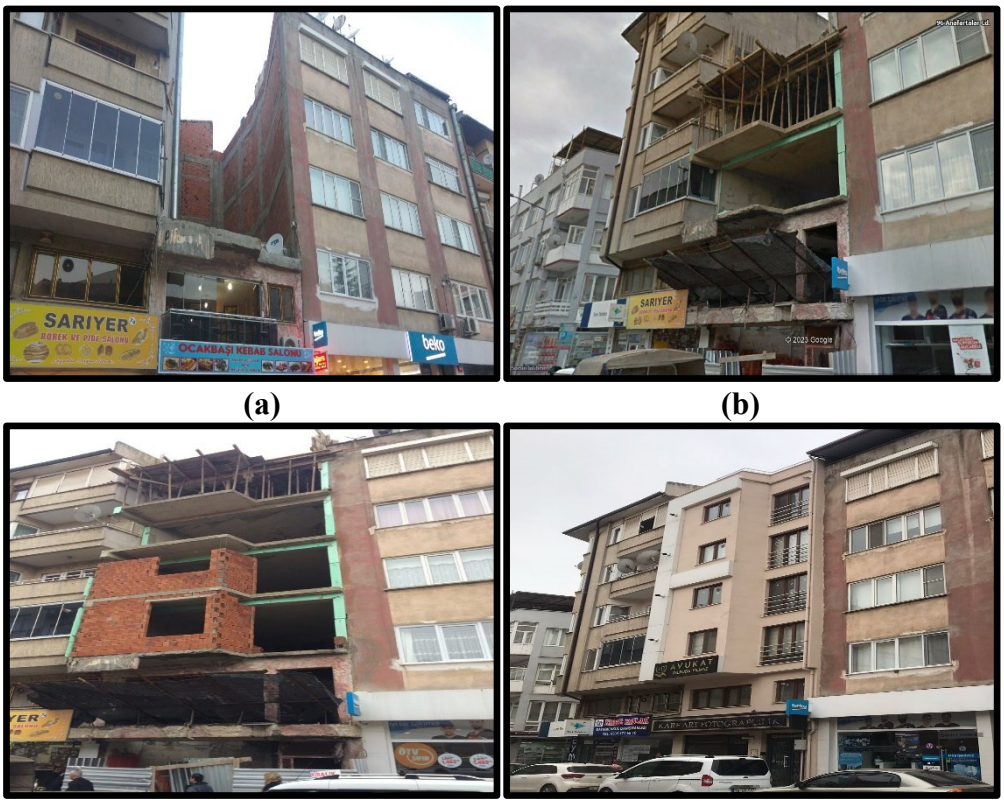
Şekil 12. Altıeylül İlçesi, Bahçelievler Mahallesi'nde incelenen binaların $P_{ÖZ\text{-}KA}$ sonuç puanları

9. Balıkesir'in yapı stoku

Yaklaşık 130 yıldır deprem yaşanmamış olan Balıkesir'in yapı stoku açısından, ülkemizin diğer şehirlerinden önemli bir farkı olduğunu söylemek pek de mümkün değildir. Yaklaşık 20 yıllık bir çalışmanın ürünü olan bir çalışma ile Balıkesir'deki yapı stoku için bir arşiv oluşturulmuş ve bazı ilginç örnekler de bu bölümde sunulmuştur;

(a) *(b)* *(c)*

Şekil 13. Balıkesir'deki düşey taşıyıcı düzensizlik örnekleri: a. Genişlemiş ara kolo, süreksizlik ve A3 düzensizliği. b. Sonradan eklenen yığma kata düşey taşıyıcı olarak konulan kalas. c. Yarısı boşta kalan ara kolon



(a) **(b)**

(c) **(d)**

Şekil 14. Uygun olmayan kolon filizleri ile sonradan kat eklenerek bitişik nizam olarak teşkil edilen bir yapı. a. Yapının ilk durumu (önceden 5 kat olarak ruhsat alınmış). b. İki kat çıkılmış inşaat süreci, c. Dört kat eklenmiş inşaat süreci. d. Yapının son durumu.

(a) **(b)**

Şekil 15. Birçok yapısal problemleri olan ve yaklaşık 30 yıl boyunca metruk kalmış bir yapı'nın 06.06.2018 tarih ve 30443 sayılı resmî gazete ile yürürlüğe riren "İmar Barışı" yasası öncesi ve sonrası durumu. a. "İmar Barışı Yasası" öncesi. b. "İmar Barışı Yasası" sonrası.

10. Sonuçlar

Yapılan çalışma ile P25 metodunda bulunan "belirsiz" (gri) bölge ortadan kaldırılmış, hızlı değerlendirmesi yapılan binalar için "göçer" ya da "göçmez" şeklinde net bir sonuç ortaya konulması sağlanmıştır. 63 adet betonarme binanın, P25 hızlı değerlendirme metodunun bu çalışmada önerilen P25 ÖZ-KA revizyonu ile hızlı değerlendirmesi yapılmış ve bunlardan 42 tanesinin (%63) göçme tehdidi altında olduğu tespit edilmiştir.

İncelenen yapılarda, güçlendirme uygulanan iki binadan; K5 binasının güçlendirme öncesi ve sonrası, her iki yapı sistemi de Göçme Riski olmayan (Beyaz) bölgede konumlanmıştır. K12 binasının güçlendirme öncesi kalıp planı Göçme Riski olan (Siyah) bölgede bulunurken, yapıya uygulanan güçlendirme sonrası Göçme Riski olmayan (Beyaz) bölgeye geçtiği görülmüştür.

Balıkesir ilinde yaşanan en büyük depremin 29 Ocak 1898 tarihinde gerçekleştiği göz önüne alındığında, günümüzde meydana gelebilecek büyük bir depremde çok büyük bir felaket ile karşı karşıya kalınacağı aşikârdır. Yaklaşık 130 yıl gibi uzun bir süredir şehir merkezinde deprem olmayan Balıkesir'in yapı stoku oldukça güvensiz durumdadır. Balıkesir'in tüm ilçeleri ile birlikte çok hızlı şekilde hareket edilerek betonarme yapıların deprem performanslarının hızlı şekilde kademelendirilmesi gerekmektedir. Göçme riski taşıyan yapıların ivedilikle boşaltılması, tarihi değere sahip yapıların bir güçlendirme programına bağlı olarak güçlendirilmesi ve restore edilmesi, tarihi değeri bulunmayan yapıların, ortaya çıkacak olan güçlendirme maliyete bağlı olarak güçlendirilmesi veya yıkılıp yeniden teşkil edilmesi gerekliliği açıktır. Bu sürecin işletilmemesi durumda Balıkesir ve çevresinde büyük felaketler yaşanması kaçınılmaz olacaktır.

Sonuç olarak, Balıkesir ve ülkemizin büyük bir bölümünde bulunan yapıların hızlı bir değerlendirme yapılarak göçme riski tespit edilen yapılar hızlıca ayıklanmalıdır. Eğer bu çalışma yapılmaz ise meydana gelecek olan ilk depremde, depreme dayanıklı olmayan yapılar çökecek ve yine ağır can kayıplarına neden olacaklardır. Bu amaçla kullanılabilecek, birçok hızlı değerlendirme metodu bulunmaktadır. Bu metotların içerisinde P25 metodu birçok parametrenin göz önüne alındığı, uygulaması her inşaat

mühendisi tarafından yapılabilecek bir hızlı değerlendirme metodudur. Bu çalışma ile önerilen P25 ÖZ-KA revizyonu ile değerlendirmesi yapılan binanın değerlendirmeyi yapacak mühendis için hayati önem taşıyan, göreli kat ötelemeleri ve deplasmanlar gibi veriler de kullanılarak P25 metodunun kapsamı ve doğruluğu arttırılmıştır.

Kaynaklar

[1] Özkul, B., Karaman A.E., Doğal afetler için risk yönetimi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, **Afet Sempozyumu**, Ankara, 251-261, (2007).

[2] Tezcan, S. S., Bal, İ. E., İstanbul kurtuluş reçetesi, **İstanbul Dergisi**, 11, 86-90, (2003).

[3] Işık, E., Kutanis M., Bitlis ilindeki betonarme binaların P25 hızlı tarama yöntemi ile değerlendirilmesi, **BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi**, 15 (1), 21-29, (2013).

[4] Pardalopoulos, S.J., Thermou, G.E., Pantazopoulou, S.J., Preliminary seismic assessment method for identifying R.C. structural failures, Editör: Papadrakakis M., Fragiadakis M., Plevris V.,Computational Methods in **Earthquake Engineering, Springer**, Dordrecht, 111-128, (2013).

[5] Pardalopoulos S.I, Pantazopoulou S.J., Lekidis V.A., Simplified method for rapid seismic assessment of older R.C. buildings, **Eng Struct**, 154, 10–22, (2018).

[6] Uğur, O.U., Aliefendioğlu, Y., Saka, M., "Afet riski altındaki alanların dönüştürülmesi hakkında kanuna göre riskli yapı tespitinde karşılaşılan uygulama problemlerinin vaka tabanlı incelenmesi: Tekirdağ ili örneği", **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi,** 4, 354-375, (2016).

[7] Işık E., Bozkurt N., Taşkın V., Muş ili yapı stoğunun kanada sismik tarama yöntemi ile incelenmesi ve bölgenin depremselliği**, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 21(2), 421-429, (2016).

[8] Gürbüz, A., Tekin, M., Farklı tip betonarme binalar için geliştirilmiş hasar tahmin yöntemleri, **İMO Teknik Dergi**, 28(4), 8051-8076, (2017).

[9] Türkel Y.E. ve Tekeli H., Konut türü betonarme binaların deprem risk değerlendirmesi, **Politeknik Dergisi**, 21(3), 669-680, (2018).

[10] Kepenek E., Korkmaz K. A., Gencel Z., Seismic risk investigation for reinforced concrete buildings in Antalya, Turkey, **Computers and Concrete**, 26(3), 203-211, (2020).

[11] Erşahan, Ö.A., Köse, M.M., Avğın, S., P25 Metodu ile Kahramanmaraş yapı stoğunun incelenmesi, **KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 23(1), 9-21, (2020).

[12] Gülen, A., R., Deprem risk analizi ve şehirleşmede Balıkesir kent merkezi örneği, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, **Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir**, (2008).

[13] Yazıcı, N., Ocak 1898 Balıkesir depremi ve sonrası, Ankara, (2003).

[14] Çelik C. O., İlki A., Yalçın C., Yüksel E., Doğu ve batı Avrupa kentlerinde değişik tip binaların deprem riskinin hızlı değerlendirmesi üzerine bir deneyim, **6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı,** 297-304, İstanbul, (2007).

[15] Tezcan S. S., Gürsoy M. ve Kaya, E., Depremde can kaybını önleme projesinin tek sorumlusu devlettir, **Dünya İnşaat Dergisi,** 107-111, (2002).

[16] Bal İ. E., "Deprem etkisindeki betonarme binaların göçme riskinin hızlı değerlendirme yöntemleri ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,** İstanbul, (2005).

[17] Tezcan, S. S., Gürsoy, M., Kaya, E. ve Bal, İ. E., Depremde can kaybını önleme projesi, **Kocaeli'99 Acil Durum Konferansı**, 146-153, İstanbul, (2003).

[18] Bal, İ.E., Tezcan, S. S. ve Gülay, F. G., Betonarme binaların göçme riskinin belirlenmesi için P25 hızlı değerlendirme yöntemi, **Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı,** 661-673, İstanbul, (2007).

[19] Gülay, G., Tezcan, S. S., Bal, İ. E. ve Sevinç, S., Binaların deprem güvenliği konusunda geliştirilen P25 puanlama yönteminin kalibrasyonu ve pilot bölge uygulaması, **106M278 TÜBİTAK Projesi**, (2008).

[20] Gülay, F. G., Kaptan, K., Bal, İ. E. ve Tezcan, S. S., P25 – Scoring method for the collapse vulnerability assessment of R/C buildings, **The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering 14**, 1219–1228, (2011).

[21] Kaptan, K., P25 Scoring method for the assessment of R/C buildings, **Journal of Civil Engineering and Architecture**, 6(7), 834–843, (2012).

[22] Sholtis, S. E. and Stewart, J. P., Topgraphic effects on seismic ground motions above and below a cut slope in sand, Research Report, **University of California, Civil and Environmental Engineering**, (1999).

[23] Çelebi, M., Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile Earthquake', **Bulletin of Seismological Society of America**, 77(4), 147-1167, (1987).

[24] NRRC-National Research Council of Canada, Manual for screening of buildings for seismic investigation. Canadian Standard, Ottowa, (1993).

[25] Doğan, M., P25 ve DURTES ön değerlendirme yöntemleri ve 1999 Düzce depreminde hasar görmüş binalara uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2012).

[26] Tural, M., Betonarme yapıların deprem güvenliklerinin hızlı değerlendirme yöntemleri ile karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, **Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Gebze, (2014).

[27] Altıner, M., Deprem etkisindeki betonarme binaların göçme riskinin saptanması için hızlı değerlendirme yöntemleri, **İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2008).

[28] Gümüşbaş, Ö., Çıkmalı bir binada çerçeve süreksizliğinin incelenmesi ve performans düzeyi ile göçme güvenliğinin belirlenmesi, **İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2010).

[29] Kaya, A., Mevcut betonarme konut tipi binaların deprem performanslarının hızlı değerlendirme metotları ile incelenmesi ve P25 metodunun geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, (2017).

DOI:10.25092/baunfbed. 1626445 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 559-568, (2025)*

Investigation of paraoxonase1 enzyme activity and Q/R 192 polymorphism in severe COVID-19 cases

Merve ARSLAN [1], Kübra ÇIKRIKÇI [2], Adem ERGÜN[2,*] Oktay ARSLAN [2]

[1]Çankırı State Hospital, Infectious Diseases and Clinical Microbiology, Çankırı
[2]Balıkesir University, Faculty of Arts and Science,
Department of Chemistry, Çağış Campus, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 24.01.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 26.03.2025

Abstract

COVID-19, an infection associated with numerous cases and deaths globally since 2019, has been a subject of extensive research. Paraoxonase1 (PON1), recognized for its antioxidant activity and contribution to the reduction of oxidative damage, is the focus of this study. The research aims to measure the activity of the human serum PON1 enzyme with detoxification and antioxidant properties in COVID-19 cases leading to pneumonia. Additionally, the phenotype of the PON1 Q/R 192 polymorphism is investigated and compared with a control group. The study includes 26 severe COVID-19 cases and 24 healthy individuals. The phenotype distribution of patients is determined as 38.48% QQ, 53.83% QR, and 7.69% RR, while in the control group, these percentages are 50.00% QQ, 29.17% QR, and 20.83% RR. Furthermore, PON1 activity is measured in 26 COVID-19 patients and 24 healthy individuals. The results indicate distinct differences in the phenotype distribution of the PON1 Q/R 192 polymorphism between COVID-19 patients and the control group. The percentages of QQ, QR, and RR are unique in both groups. Additionally, PON1 activity is measured, revealing that the control group exhibits higher PON1 activity compared to the affected individuals.

Keywords: *Paraoxonase1, SARS-CoV-2, COVID-19, Q/R 192R polymorphism.*

Merve ARSLAN, mrvdrarslan102526@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-4191-0145
Kübra ÇIKRIKÇI, kubracikrikci1991@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-2276-1516
[*]Adem ERGÜN, ademergun@balikesir.edu.tr, http://orcid.org/0000-0003-4647-6058
Oktay ARSLAN, oktay@balikesir.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-2549-4997

Ağır COVID-19 geçiren hastalarda paraoksonaz1 enzim aktivitesinin ve Q/R 192 polimorfizminin araştırılması

Öz

COVID-19, 2019 yılından bu yana dünya genelinde çok sayıda vaka ve ölümle ilişkilendirilen bir enfeksiyon olup, kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Antioksidan aktivitesi ve oksidatif hasarın azaltılmasına katkısı ile bilinen Paraoksonaz1 (PON1), bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. Araştırma, zatürreye yol açan COVID-19 vakalarında detoksifikasyon ve antioksidan özelliklere sahip insan serum PON1 enziminin aktivitesini ölçmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, PON1 Q/R 192 polimorfizminin fenotipi incelenmiş ve bir kontrol grubu ile karşılaştırılmıştır. Çalışma, 26 ağır COVID-19 vakası ve 24 sağlıklı bireyi içermektedir. Hastaların fenotip dağılımı %38,48 QQ, %53,83 QR ve %7,69 RR olarak belirlenirken, kontrol grubunda bu oranlar sırasıyla %50,00 QQ, %29,17 QR ve %20,83 RR olarak bulunmuştur. Bunun yanı sıra, 26 COVID-19 hastası ve 24 sağlıklı bireyde PON1 aktivitesi ölçülmüştür. Sonuçlar, COVID-19 hastaları ile kontrol grubu arasında PON1 Q/R 192 polimorfizminin fenotip dağılımında belirgin farklılıklar olduğunu göstermektedir. QQ, QR ve RR yüzdeleri her iki grupta da benzersizdir. Ayrıca, PON1 aktivitesi ölçümleri, kontrol grubunun etkilenen bireylere kıyasla daha yüksek PON1 aktivitesi sergilediğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: *Paraoksonaz1, SARS-CoV-2, COVID-19, Q/R 192R polimorfizim.*

1. Introduction

In December 2019, a pneumonia outbreak characterized by an unidentified cause emerged within the city of Wuhan, situated in China's Hubei province. In response to the escalating count of cases spreading beyond national borders, the World Health Organization (WHO) declared a global health emergency on January 30, 2020 [1]. The pathogen responsible for this illness, known as severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2), has resulted in widespread infections and fatalities across the globe [2]. Individuals infected with SARS-Cov-2 often experience upper respiratory tract symptoms such as fever, cough, nasal congestion and fatigue. Approximately 75% of these individuals have prominent chest findings corresponding to shortness of breath and pneumonia symptoms. Pneumonia usually appears in the clinic in the later weeks of infection, especially in the second or third week. Decreased oxygen saturation, abnormalities in blood gases, specific findings on radiological imaging and ground glass opacities play a critical role in the diagnosis of viral pneumonia [3]. Today, as a result of the measures taken, the vaccines developed and the mutations occurring in the virus, there are no major problems on a global scale. However, the rapid transmission ability of the virus in question and the infection it causes affect people's quality of life and cause a great loss of workforce. For a successful infection, viral pathogens manipulate the host metabolism to create a suitable habitat for themselves. The metabolic resources within the host cell play a crucial role in synthesizing various viral components, including viral nucleic acids, proteins, and membranes. Many viruses adeptly manipulate the host cell's metabolism to optimize their

own biosynthetic requirements, inducing specific metabolic alterations that favor viral replication and proliferation [1]. On the other hand, different metabolic strategies have been designed to inhibit viral replication through antiviral metabolic changes in host cells [2]. Oxidative stress produced in host cells during this process is thought to cause mitochondrial dysfunction. As a natural consequence, more free radicals will be produced in the affected tissue [4].

Indeed, the innate immune system encompasses mechanisms designed to shield against oxidative stress, with the PON protein family standing out as one of its pivotal components. These enzymes are a group of proteins in three forms encoded by the PON1, PON2 and PON3 genes. PON1, the most studied isoenzyme in this protein group, is a metalloenzyme synthesized in the liver and circulating in the circulation bound to high-density lipoproteins. PON1, whose primary structure consists of 355 amino acid residues, contains two calcium ions. One of these ions is involved in the stabilization of the three-dimensional structure of the enzyme, while the other is known to be critical in the catalytic mechanism of PON1 [5].

PON1 has important roles in the organism with antioxidant, anti-atherosclerotic and anti-inflammatory effects with a wide range of substrate specificity. The PON family plays a crucial role in impeding the oxidative modification of low-density lipoprotein (LDL), thereby effectively suppressing the transition of monocytes into macrophages. This inhibition marks the initial stage of preventing the progression of atherosclerosis, a condition characterized by the accumulation of plaque in arteries. Additionally, PON1 stimulates cholesterol efflux from macrophages, preventing the accumulation of oxidized LDL. Indeed, extensive research has focused on investigating the enzymatic activity of the PON family, particularly the role of PON1, in relation to the development of various diseases. These studies have delved into its potential implications in conditions ranging from cancer and cardiovascular ailments to neurological disorders and inflammatory diseases. Understanding the involvement of PON1 has been a critical pursuit in unraveling the mechanisms underlying these diverse health conditions [5–8]. It has also been shown that serum PON1 activity in patients with HIV infection is reduced compared to the normal population, and these changes are associated with the patients' immunological status and degree of inflammation [9]. Apart from this, researchers have reported that oxidative stress increases and serum PON1 activities decrease in other viral infections such as influenza, hepatitis B and hepatitis C [9–12].

The polymorphism in the coding region, which affects the activity and level of PON1, occurs as a result of the substitution of glutamine (Q) and arginine (R) amino acids at codon 192 [13]. The Q192 isoform has a higher paraoxon hydrolyzing capacity than the R192 isoform and also metabolizes oxidized LDL more effectively. Polymorphic variations of PON1 may vary depending on ethnicity, gender, age, and environmental factors [9]. Activity and polymorphism variations of the PON1 enzyme have been associated with many pathological conditions [10,14]. The effect of Q192R polymorphism on oxidative status has been identified as a biomarker. Inhibition of LDL oxidation, especially QQ, is highest in homozygous individuals, while RR is lowest in homozygous individuals [15]. PON1 has been identified and researched as a potential therapeutic tool against atherosclerosis development [16]. However, investigations into the association between the PON1Q192R polymorphism and cardiovascular diseases have yielded conflicting results. While certain studies have indicated a positive link between the PON1192RR genotype and coronary disease, this relationship remains a

topic of contention in scientific research [9,13]. While others found no association [10,15,17]. It states that infectious diseases such as COVID-19 are associated with oxidative stress and inflammatory responses [4,9]. Additionally, a potential association between the prevalence and mortality rates of COVID-19 and the L55M functional polymorphism of PON1 has been identified [18]. In this study, PON1 activities in patients with severe COVID-19 will be determined and the distribution of PON1 Q192R polymorphism will be investigated. An idea will be obtained about the effect of this genetic variation against COVID-19 by comparing it with healthy individuals.

2. Material and method

2.1. Materials

Paraoxon-ethyl, Tris-Base and NaCl (sodium chloride) compounds were supplied from Sigma-Aldrich. Bio-Tech UV spectrophotometer was used in the experiments. Approval from the relevant ethics committee was obtained to conduct the study. (Çankırı Karatekin University Health Sciences Ethics Committee, Çankırı, Turkey, Meeting No: 27 Date: 10.10.2022)

2.2. Collection of blood samples

Blood samples were collected from; 26 patients with symptoms of fever, muscle and joint pain, cough, sore throat, tachypnea (≥30/minute), SpO2 level ≤ 90% in room air, and bilateral pneumonia findings detected in radiological examinations were included. As the control group, 24 healthy individuals who had not previously had COVID-19 infection were selected. Immediately after blood samples were taken, they were centrifuged at 3000 rpm for 10 minutes and the resulting sera were stored at -80°C. Informed consent forms were obtained from all individuals.

2.3. Measurement of PON1 enzyme activity

Measurement of PON1 enzyme activity was performed according to the protocol described by Eckerson et al. [19]. According to this methodology, the hydrolysis rate of paraoxon was determined spectrophotometrically as the absorbance change over a period of 1 min at a wavelength of 412 nm at a temperature of 37 °C. Activity values were calculated using an extinction coefficient of 17100 M^{-1} cm^{-1}. One unit (U) of paraoxonase activity was expressed as 1 µmol *p*-nitrophenol formed per minute. Paraoxon substrate was prepared fresh before each experiment.

2.4. PON1 phenotype analysis

For the phenotypic analysis of the paraoxonase enzyme, basal and post-salt stimulation activities were measured, and the phenotype was determined through the following formula:

$$\frac{Paraoxonase\ Activity - Basal\ Paraoxonase\ Activity\ in\ the\ presence\ of\ 1\ M\ NaCl}{Basal\ Paraoxonase\ Activity} \text{x100}$$

With this analysis method, three different activity distribution was observed. As a result of the formula, values up to 60% represent low-activity homozygous QQ, values between 60-200% represent medium-activity heterozygous QR, and values of 200% and above represent high-activity homozygous RR [20].

2.5. Statistical analyses

Statistical analysis was performed using Microsoft Excel for Windows. When more than two groups were compared, analysis of variance, ANOVA, was used. Data are presented as mean ± standard deviation.

3. Results and discussion

The COVID-19 pandemic has deeply affected human health globally. This health crisis caused by the SARS-CoV-2 virus has led scientists to in-depth research on this subject [21]. In this scientific study, the potential relationship of PON1 polymorphism with COVID-19 was investigated. The study included patients who were diagnosed with COVID-19, had symptoms such as fever, muscle-joint pain, cough and sore throat, had tachypnea (≥30/minute), had SpO2 levels measured below 90% in room air, and had chest radiography or tomography. 26 patients (10 women, 16 men) with bilateral widespread pneumonia findings participated. As a control group, 24 healthy individuals (15 women, 9 men) who did not show any symptoms of pneumonia and did not have COVID-19 infection were included in the study. Blood serum samples from both groups were collected for analysis.

In this study, serum PON1 activities of all individuals were determined individually. Then, the arginine/glutamine (R/Q) polymorphism at position 192 was detected in individuals by the method mentioned above. The values found in the research are summarized in Table 1 and Table 2. Activity and polymorphism results of all individuals are not given considering the scope of the article. It was determined that 11 (42.30%) of 26 patients had QQ, 13 (50%) QR and 2 (7.69%) RR genotypes. It was determined that 13 (54.16%) of the individuals in the control group had QQ, 6 (25%) QR and 5 (20.83%) RR genotypes (Table 1). Additionally, the PON1 activity of the control group (31.9 ±10.4) was found to be higher than the patient group (23.8 ±10.1) (Table 2).

Although the paraoxonase enzyme has many polymorphisms, the arginine/glutamine (R/Q) polymorphism at position 192 attracts particular attention. PON1 is produced in the liver and circulates bound to high-density lipoprotein HDL, and plays an antioxidant role by inhibiting LDL oxidation. Additionally, it has been determined that PON1 is of critical importance in protecting individuals from various diseases thanks to its anti-inflammatory and detoxification properties [22–24]. Therefore, there are findings in the literature that PON1 activity and polymorphism are associated with cardiovascular diseases, pulmonary disease, diabetes, Alzheimer's and cancer risk [23–27]. Studies on PON1 polymorphism in the literature have stated that the RR phenotype is frequently observed among individuals with coronary heart disease, and among Alzheimer's patients, those carrying the R allele have higher serum PON1 activity than those carrying the Q allele [14]. In another study conducted on PON1 polymorphism (rs662), the effect of PON1 polymorphism on disease severity and mortality in COVID-19 patients was evaluated by examining the lipid profile and arylesterase (ARE) activity of PON1 in 470 COVID-19 patients.

This study showed that PON1 polymorphism may affect COVID-19 disease severity and mortality [28]. The genetic distribution of paraoxonase may vary among different ethnicities. In a study conducted on the Turkish population, it was determined that the genotype distribution was 46.7% QQ, 44.6% QR and 8.7% RR [29]. During previous

epidemics and the COVID-19 pandemic, it has been suggested that viral infections vary depending on ethnicity and environmental factors [30].

Our results show that the PON1 activity of patients with severe COVID-19 infection is lower than that of the healthy control group. Oxidative stress markers, such as paraoxonase (PON) activity, have been shown to play a significant role in the prognosis and follow-up of patients in intensive care, particularly in conditions involving trauma [31] and severe infections like COVID-19. Similar to findings in osteoporosis, where reduced PON1 activity is associated with increased oxidative stress and bone loss, our study also highlights the potential role of decreased PON1 activity in exacerbating oxidative damage in severe COVID-19 cases [32]. Furthermore, in conditions such as polycystic ovary syndrome (PCOS), reduced PON1 activity has been linked to increased cardiovascular risk and hormonal imbalances, further supporting the notion that PON1 plays a critical role in modulating oxidative stress and inflammatory responses across various diseases [33]. Moreover, recent studies have demonstrated that PON1 activity can be significantly inhibited by various drugs, such as furosemide and enrofloxacin, with furosemide showing a stronger inhibitory effect (IC_{50} = 9.87 mM) compared to enrofloxacin (IC_{50} = 42.21 mM), further emphasizing the importance of understanding drug-enzyme interactions in the context of oxidative stress and disease progression [34]. Recent studies have shown that PON1 activity varies significantly across different species, with purification methods such as ammonium sulfate precipitation and hydrophobic interaction chromatography yielding high-specific activity enzymes, as demonstrated in bovine breeds like Swiss Black, Holstein, and Montofon [35].

These findings suggest that individuals with low PON1 activity may be more susceptible to a severe course of COVID-19 infection. This is consistent with the literature, which supports a relationship between PON1 activity and the severity of viral infections. Additionally, we observed distinct differences in the phenotype distribution between COVID-19 patients and the control group. Specifically, the QQ phenotype was more prevalent in the control group, while the QR phenotype was more common in the patient group. This indicates that the PON1 Q192R polymorphism may be associated with either susceptibility to COVID-19 or the severity of the disease.

The findings of this study are consistent with previous reports on the genotype distribution in the Turkish population [29]. However, these results may not fully represent of the general Turkish population, as viral infections can vary depending on ethnic and environmental factors, and the sample size is limited. Despite these limitations, our study suggests a possible association between COVID-19, paraoxonase 1 (PON1) activity, and the Q192R polymorphism. Given the crucial role of PON1 in reducing oxidative stress, our findings indicate that COVID-19 may alter oxidative stress levels in the body, potentially leading to a decrease in PON1 activity. We believe that these results will contribute to a deeper understanding of COVID-19 pathogenesis and may have implications for future therapeutic strategies.

Table 1. Phenotyping of the control and patient groups.

	PON1 Activity (in 1M NaCl) U		**Basal PON1 Activity U**		**Phenotype**	
No	**Control**	**Patient**	**Control**	**Patient**	**Control**	**Patient**
1	353.7	358.6	108.1	153.5	RR	QR
2	239.5	154.7	153.5	94.5	QQ	QR
3	176.8	184.2	119.1	84.7	QQ	QR
4	265.3	43.0	27.0	23.3	RR	QR
5	192.8	142.5	128.9	89.6	QQ	QQ
6	200.9	110.5	149.8	58.9	QQ	QR
7	254.2	144.9	46.7	40.5	RR	RR
8	332.8	82.3	136.3	13.5	QR	RR
9	165.8	104.4	105.6	88.4	QQ	QQ
10	143.7	77.4	105.6	36.8	QQ	QR
11	200.2	126.5	94.6	50.3	QR	QR
12	190.3	224.7	120.3	82.2	QQ	QR
13	272.6	165.7	70.00	77.3	RR	QR
14	194.0	200.1	100.7	115.4	QR	QR
15	243.2	160.8	157.2	85.9	QQ	QR
16	178.1	141.2	81.1	116.6	QR	QQ
17	133.9	244.3	100.7	111.7	QQ	QR
18	244.4	52.8	111.7	30.7	QR	QR
19	264.0	111.7	52.8	98.2	RR	QQ
20	202.6	23.3	94.6	22.1	QR	QQ
21	230.9	34.3	162.1	22.1	QQ	QQ
22	170.7	111.7	146.1	51.5	QQ	QR
23	174.4	101.9	160.9	70.0	QQ	QQ
24	194.0	44.2	117.9	30.7	QR	QQ
25		40.5		17.1		QR
26		60.1		44.2		QQ

Table 2. Phenotype percentages and demographic characteristics of the patient and control groups.

PHENOTYPE	**PATIENT (n=26) (10 women and 16 men)**	**CONTROL (n=24) (15 women and 9 men)**
QQ (Homozygous)	%42.30	%54.16
QR (Heterozygous)	%50	%25
RR (Homozygous)	% 7.69	%20.83
Age (± SDI)	66.7 (±17.9)	37.5 (±12.1)
PON1 activity (U/µl dak)	23.8 (±10.1)	31.9 (±10.4)

References

[1] Velavan, T.P. and Meyer, C.G., The COVID-19 epidemic., **Tropical Medicine & International Health : TM & IH**, 25, 3, 278–280, (2020).

[2] Nalbandian, A., Sehgal, K., Gupta, A., Madhavan, M.V, McGroder, C., et al., Post-acute COVID-19 syndrome., **Nature Medicine**, 27, 4, 601–615, (2021).

[3] Guan, C.S., Lv, Z. Bin, Yan, S., Du, Y.N., Chen, H., et al., Imaging Features of Coronavirus disease 2019 (COVID-19): Evaluation on Thin-Section CT., **Academic Radiology**, 27, 5, 609–613, (2020).

[4] Rodríguez-Tomàs, E., Iftimie, S., Castañé, H., Baiges-Gaya, G., Hernández-Aguilera, A., et al., Clinical Performance of Paraoxonase-1-Related Variables and Novel Markers of Inflammation in Coronavirus Disease-19. A Machine Learning Approach., **Antioxidants (Basel, Switzerland)**, 10, 6, (2021).

[5] Medina-Díaz, I.M., Ponce-Ruíz, N., Rojas-García, A.E., Zambrano-Zargoza, J.F., Bernal-Hernández, Y.Y., et al., The Relationship between Cancer and Paraoxonase 1., **Antioxidants (Basel, Switzerland)**, 11, 4, (2022).

[6] Hussain, T., Tan, B., Yin, Y., Blachier, F., Tossou, M.C.B., et al., Oxidative stress and inflammation: what polyphenols can do for us?, **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, 2016, 1, 7432797, (2016).

[7] Kattoor, A.J., Pothineni, N.V.K., Palagiri, D., and Mehta, J.L., Oxidative stress in atherosclerosis, **Current Atherosclerosis Reports**, 19, 1–11, (2017).

[8] Rendra, E., Riabov, V., Mossel, D.M., Sevastyanova, T., Harmsen, M.C., et al., Reactive oxygen species (ROS) in macrophage activation and function in diabetes, **Immunobiology**, 224, 2, 242–253, (2019).

[9] Delgado-Roche, L. and Mesta, F., Oxidative stress as key player in severe acute respiratory syndrome coronavirus (SARS-CoV) infection, **Archives of Medical Research**, 51, 5, 384–387, (2020).

[10] Uysal, S., Akyol, S., Hasgül, R., Armutcu, F., and Yiğitoğlu, M.R., Çok yönlü bir enzim: Paraoksonaz, **Yeni Tıp Dergisi**, 28, 3, 136–141, (2011).

[11] Kilic, S.S., Serum arylesterase and paraoxonase activity in patients with chronic hepatitis, **World Journal of Gastroenterology**, 11, 46, 7351, (2005).

[12] Wang, F.-S., Current status and prospects of studies on human genetic alleles associated with hepatitis B virus infection, **World Journal of Gastroenterology**, 9, 4, 641, (2003).

[13] Mackness, B., Durrington, P.N., and Mackness, M.I., Human Serum Paraoxonase, **General Pharmacology**, 31, 3, 329–336, (1998).

[14] Dantoine, T.F., Drouet, M., Debord, J., Merle, L., Cogne, M., et al., Paraoxonase 1 192/55 gene polymorphisms in Alzheimer's disease, **Annals of the New York Academy of Sciences**, 977, 1, 239–244, (2002).

[15] Durrington, P.N., Mackness, B., and Mackness, M.I., Paraoxonase and atherosclerosis, **Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology**, 21, 4, 473–480, (2001).

[16] La Du, B.N., Aviram, M., Billecke, S., Navab, M., Primo-Parmo, S., et al., On the physiological role(s) of the paraoxonases, **Chemico-Biological Interactions**, 119–120, 379–388, (1999).

[17] Kotur-Stevuljevic, J., Spasic, S., Jelic-Ivanovic, Z., Spasojevic-Kalimanovska, V., Stefanovic, A., et al., PON1 status is influenced by oxidative stress and inflammation in coronary heart disease patients., **Clinical Biochemistry**, 41, 13, 1067–1073, (2008).

[18] Saadat, M., Prevalence and mortality of COVID-19 are associated with the L55M

functional polymorphism of Paraoxonase 1, **Proceedings of Singapore Healthcare**, 31, 20101058211040584, (2022).

[19] Eckerson, H.W., Wyte, C.M., and La Du, B.N., The human serum paraoxonase/arylesterase polymorphism., **American Journal of Human Genetics**, 35, 6, 1126, (1983).

[20] La Du, B.N. and Eckerson, H.W., The polymorphic paraoxonase/arylesterase isozymes of human serum., **Federation Proceedings**, 43, 8, 2338–2341, (1984).

[21] Ammar, A., Chtourou, H., Boukhris, O., Trabelsi, K., Masmoudi, L., et al., COVID-19 home confinement negatively impacts social participation and life satisfaction: a worldwide multicenter study, **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17, 17, 6237, (2020).

[22] Mackness, M.I., Mackness, B., Arrol, S., Wood, G., Bhatnagar, D., et al., Presence of paraoxonase in human interstitial fluid, **FEBS Letters**, 416, 3, 377–380, (1997).

[23] Nie, Y., Luo, D., Yang, M., Wang, Y., Xiong, L., et al., A meta-analysis on the relationship of the PON genes and Alzheimer disease, **Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology**, 30, 6, 303–310, (2017).

[24] Hofer, S.E., Bennetts, B., Chan, A.K., Holloway, B., Karschimkus, C., et al., Association between PON 1 polymorphisms, PON activity and diabetes complications, **Journal of Diabetes and Its Complications**, 20, 5, 322–328, (2006).

[25] Furlong, C.E., Marsillach, J., Jarvik, G.P., and Costa, L.G., Paraoxonases-1, -2 and -3: What are their functions?, **Chemico-Biological Interactions**, 259, 51–62, (2016).

[26] Bacchetti, T., Ferretti, G., and Sahebkar, A., The role of paraoxonase in cancer, **Seminars in Cancer Biology**, 56, October, 72–86, (2019).

[27] Sarioglu, N., Bilen, C., Cevik, C., and Gencer, N., Paraoxonase activity and phenotype distribution in patients with chronic obstructive pulmonary disease, **Eurasian Journal of Medicine**, 52, 2, 161–165, (2020).

[28] Ghoreshi, Z.-A.-S., Abbasi-Jorjandi, M., Asadikaram, G., Sharif-Zak, M., Seyedi, F., et al., Paraoxonase 1 rs662 polymorphism, its related variables, and COVID-19 intensity: Considering gender and post-COVID complications, **Experimental Biology and Medicine**, 15353702221128564, (2022).

[29] Kaman, D., İlhan, N., Metin, K., Akbulut, M., and Üstündağ, B., A preliminary study of human paraoxonase and PON 1 L/M55–PON 1 Q/R 192 polymorphisms in Turkish patients with coronary artery disease, **Cell Biochemistry and Function**, 27, 2, 88–92, (2009).

[30] Stafford, M., Boolaky, U., Elwell-Sutton, T., Asaria, M., and Nazroo, J., How to interpret research on ethnicity and COVID-19 risk and outcomes: five key questions, (2020).

[31] Akyuva, Y., Nur, G., Deveci, H.A., and Kocabas Guler, S., Oxidative stress and biochemical alterations in patients with head and multiple organ traumas, **Turkish Neurosurgery**, 33, 5, 855–861, (2023).

[32] Deveci, H.A., Nur, G., Cicek, H., and Karapehlivan, M., Evaluation of oxidative stress factors in patients with osteoporosis, **Medicine Science**, 6, 3, 479–482, (2017).

[33] Deveci, H.A., Nur, G., Alpay, M., and Özmerdivenli, R., Levels of paraoxonase, high-density lipoprotein and total sialic acid levels in patients with polycystic ovary syndrome, **Journal of Cellular Neuroscience and Oxidative Stress**, 9, 2, 630–636, (2017).

[34] Ergün, A., Yüksel, H., Arslan, M., and Arslan, O., Investigation of the effects of some drugs on sheep Paraoxonase-1, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 25, 2, 483–488, (2023).

[35] Erzengin, M., Demir, D., Arslan, M., and Sinan, S., Purification and characterization of paraoxonase 1 (PON1) from Swiss Black, Holstein, and Montofon bovines, **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 173, 7, 1597–1606, (2014).

DOI:10.25092/baunfbed. 1596321 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 569-586, (2025)*

Classification of news about Turkey in the foreign press through text mining

Murat ISIK[1,*], Emrah AYDEMİR[2]

[1] *Department of Computer Engineering, Kirsehir Ahi Evran University, Kirsehir, TURKEY,*
[2] *Management Information Systems, Sakarya University, Sakarya, TURKEY.*

Geliş Tarihi (Received Date): 04.12.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 03.04.2025

Abstract

In recent years, many newspapers and news providers have begun presenting their content via web pages or through social media. This shift has led to a massive increase in the volume of news content available, necessitating the analysis and management of this vast information flow. In this study, 8,385 pieces of news content related to Turkey were collected from the web pages of major foreign news content providers, including Fox, The Guardian, BBC, and CNN. While traditional techniques classify news texts into categories based on their content, this study achieved an average accuracy rate of 89.36% by classifying the contents according to eight predefined areas of interest. Moreover, analyses were conducted based on the publication dates of all foreign news content, revealing relationships between the dates of publication and the classified areas of interest. Additionally, sentiment analysis was conducted on the collected foreign news content using the BERT algorithm, which identified the sentiment categories of the contents and examined the perception of Turkey in the foreign press.

Keywords: *Sentiment analysis, BERT, text mining, data mining, news analysis, classification of news, relationship between news dates and content.*

Metin madenciliği ile Türkiye'nin yabancı basındaki imajının analizi

Öz

Son yıllarda, birçok gazete ve haber sağlayıcısı içeriklerini web sayfaları ve sosyal medya aracılığıyla sunmaya başlamıştır. Bu dönüşüm, haber içeriklerinin hacminde büyük bir

[*]Murat IŞIK, muratisik@ahievran.edu.tr, https://orcid.org/0000-0003-3200-1609
Emrah Aydemir, aydemir.emrah23@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8380-7891

artışa yol açarak bu geniş bilgi akışının analiz edilmesi ve yönetilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu çalışma kapsamında, Fox, The Guardian, BBC ve CNN gibi büyük yabancı haber sağlayıcılarının web sayfalarından Türkiye ile ilgili 8.385 haber içeriği toplanmıştır. Geleneksel teknikler, haber metinlerini içeriklerine göre sınıflandırırken, bu çalışmada içerikler önceden tanımlanmış ilgi alanlarına göre sınıflandırılarak %89,36'lık ortalama bir doğruluk oranı elde edilmiştir. Ayrıca, yabancı haber içeriklerinin yayımlanma tarihleri temelinde yapılan analizler, yayımlanma tarihleri ile sınıflandırılmış ilgi alanları arasındaki ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. Bunun yanı sıra, BERT algoritması kullanılarak toplanan haber içeriklerinde duygu analizi gerçekleştirilmiş, içeriklerin duygu kategorileri belirlenmiş ve Türkiye'nin yabancı basındaki algısı incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: *Duygu analizi, BERT, metin madenciliği, veri madenciliği, haber analizi, haber sınıflandırması, haber tarihleri ve içerik ilişkisi.*

1. Introduction

Since the mid-1980s, there has been an unprecedented explosion in the capacity to generate, store, and transmit data worldwide, especially in digital format [1]. This data explosion has largely produced textual content, which is often found in an unstructured format. Being unstructured implies that the textual data is free-form, containing ambiguities in words and sentences [2]. The unstructured nature of textual data has necessitated the development of specialized tools for its storage, processing, and extraction of meaningful information. At this juncture, Text Mining techniques have emerged as a powerful tool in the analysis of large textual datasets and the extraction of meaningful information from them [3]. Text mining, gaining popularity with large data sources [3, 4], is the process of extracting previously unknown information from large volumes of unstructured text [5, 6].

In the field of text mining, a significant focus has been placed on the classification of news content [2]. This emphasis stems from the fact that news content is among the most crucial textual materials, impacting various segments of society and desired to be classified [4]. Indeed, news has transcended merely announcing current events; it now shapes societal thought structures, influences values, and fosters participation in democratic processes. In this context, the transformation of news content from merely a source of information to a social force that enhances awareness of societal events has been impactful. Today, accessing news content has never been easier, faster, or more effortless. Thanks to online news providers [7] and social media platforms [8, 9], news is readily accessible. However, this ease of access has led to a massive increase in the volume of news available, complicating users' ability to reach news of interest [10] and making the analysis of news content increasingly challenging.

The primary objective of this study is to collect and analyze news related to Turkey in the foreign press. This analysis aims to examine the relationships between news contents about Turkey in the foreign media and to conduct sentiment analyses. This goal will be achieved through two main objectives. The first objective is to successfully classify news contents according to the areas of interest of the user. The second objective is to analyze and resolve foreign news content based on their publication dates, classification results, and the sentiment categories they possess.

Unlike previous studies that classify news based on categories predefined by content providers, this study introduces a novel approach by categorizing news according to eight areas of interest and performing sentiment analysis using BERT. The integration of traditional machine learning models (RF, KNN, SVM, MNB) with BERT's deep learning capabilities enhances the robustness of the analysis.

The paper is structured as follows: The introduction outlines the research gap and objectives. The related work section discusses previous studies on text mining and sentiment analysis. The methods section details data collection, preprocessing, and model training techniques. The results section presents performance metrics for each model, and the discussion evaluates the implications of these results. Finally, the conclusion summarizes key findings and suggests areas for future research.

2. Related literature

Hassani and colleagues [3] emphasized the power of text mining within big data analytics in their study and explored its potential applications. Furthermore, they offered suggestions for successful analyses of news content using text mining techniques. In this context, it is evident that text mining is highly effective in analyzing news content. Some studies concerning the classification of news content and the use of the BERT algorithm in these contents are presented below.

Leonard and colleagues [11] have utilized news headlines to classify news content into existing categories. They achieved 90% accuracy with their SVC model-based system and conducted comparisons with Linear Regression, Multinomial Naive Bayes, Decision Tree, and Random Forest models. The study utilized news content collected from a single source. It was used for classifying news into pre-defined categories rather than according to areas of interest. Moreover, no analysis of the relationships between news publication dates or sentiment analysis was conducted.

Agarwal and colleagues [12] used Random Forest, Decision Tree, k-Nearest Neighbors Classifier, and Gaussian Naive Bayes algorithms to classify news according to areas of interest, achieving the highest result with Random Forest at 91.94%. The study primarily classified news contents based on categories determined by the content provider, rather than by areas of interest. The news contents were collected from a single source. The study did not focus on examining areas of interest, conducting sentiment analysis, or analyzing the historical relationships of the news.

Sadjadi and colleagues [13] proposed a semi-supervised model that works with both labeled and unlabeled data for classifying news content across two levels. In their study, they examined data sets collected from two different sources, classifying the first data set into four categories and the second into five categories, according to categories determined by the content providers. They achieved an accuracy rate of 77.3% for the first data set and 81.92% for the second. The classification was carried out according to the categories defined by the news providers, and different numbers of categories were used in different data sets. Unlike the traditional category-based classification, the proposed study conducted classification based on areas of interest, utilizing eight different interest areas across content obtained from all providers. The success rate of the proposed approach was relatively higher compared to the results of the study examined.

In a 2018 study, Miao and colleagues [14] employed the TF-IDF feature extractor and worked on classification models based on KNN, NB, and SVM algorithms. They achieved the highest F1-Score with the SVM algorithm at 95.7%. In 2021, Salehin and associates [15] collected news in the Bangla language and classified it according to categories defined by the publisher using various machine learning models (LR, MNB, SVM, RF, XGBoost, MLP, and LSTM). They opted for TF-IDF as the feature extractor and worked on a total of 75,951 news contents. The highest accuracy was obtained with the LSTM model at 87%. However, these studies conducted classification based on categories predefined by the content providers and worked with content obtained from a single source. Additionally, they employed only one type of feature extractor. No sentiment analysis or analysis of news publication dates was conducted in these studies.

Lin and colleagues [16] conducted a study where they utilized BERT to analyze news content, enabling the detection of harmful news. Their proposed method achieved an F1-score of 66.3%. Additionally, the developed method demonstrated good performance in identifying cases of information distortion. In this reviewed study, data indicating the emotional state of news content was used to discern the relationship between harmful and fake news. In the proposed study, however, BERT were utilized in evaluating the overall condition of the news.

Hayawi and colleagues [17] developed a model that employs XGBoost, LSTM, and BERT to perform sentiment analysis on news about the COVID-19 vaccine, achieving an accuracy rate of 98% with BERT. Similarly, To and colleagues [18] developed a new model to identify anti-vaccine sentiments during the COVID-19 vaccination process, achieving the best result with a BERT-based SVM algorithm at 92.3%. In these studies, the value derived from BERT was used solely for classification purposes. In the proposed study, however, it has been used for the analysis of news content.

Ahmet et al. [19] reviewed several existing approaches for classifying online news articles and discussed a framework for the automatic classification of these articles. They achieved a 93% accuracy rate using a Bayesian classifier among methods including NB, KNN, SVM, and LR. Their analysis was limited to categories previously determined by the news content provider. Additionally, their study did not encompass emotion analysis or investigate the publication dates of the news.

In the literature, there are numerous studies related to the classification of news articles [20-23] ; however, it has been observed that the use of the BERT algorithm in news content generally focuses on the detection of fake news [24-26]. Most existing studies focus on classifying news into categories predefined by content providers, which limits the scope of analysis to surface-level understanding. This study addresses this gap by leveraging BERT for sentiment analysis in combination with traditional classifiers to provide a dual-layer analysis. The application of BERT in this study is innovative as it enables the detection of nuanced sentiment across different areas of interest, providing deeper insights into how Turkey is portrayed in the foreign press. Unlike previous works that used BERT solely for classification, this study employs it to reveal sentiment trends over time and across different news categories. Additionally, no studies were found that analyze the relationship between the publication dates of news articles.

3. Methods

In the transformation of unstructured news texts into numerical data, feature extractors such as TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) [27], WIDF (Weighted Inverse Document Frequency) [28], and GWS (Glasgow Weighting) [29] have been utilized. For the classification of news texts, classifiers such as RF (Random Forest) [30], SVM (Support Vector Machine) [31], KNN (K-Nearest Neighbor) [32], and MNB (Multinomial Naive Bayes) [33] have been employed. For the sentiment analysis of news content, the BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) algorithm [34], one of today's most popular sentiment analysis models, has been used.

During the implementation phase of the study, a computer equipped with an Intel (R) Core (TM) i7-10750H CPU (2.6 GHz), 32.00 GB RAM, a 64-bit Operating System, and an 8GB Nvidia GPU was utilized. In the development phase of the application, the Python programming language was used, incorporating libraries such as NLTK (Natural Language Toolkit) and Spacy. The architecture of the proposed model can be seen in Figure 1.

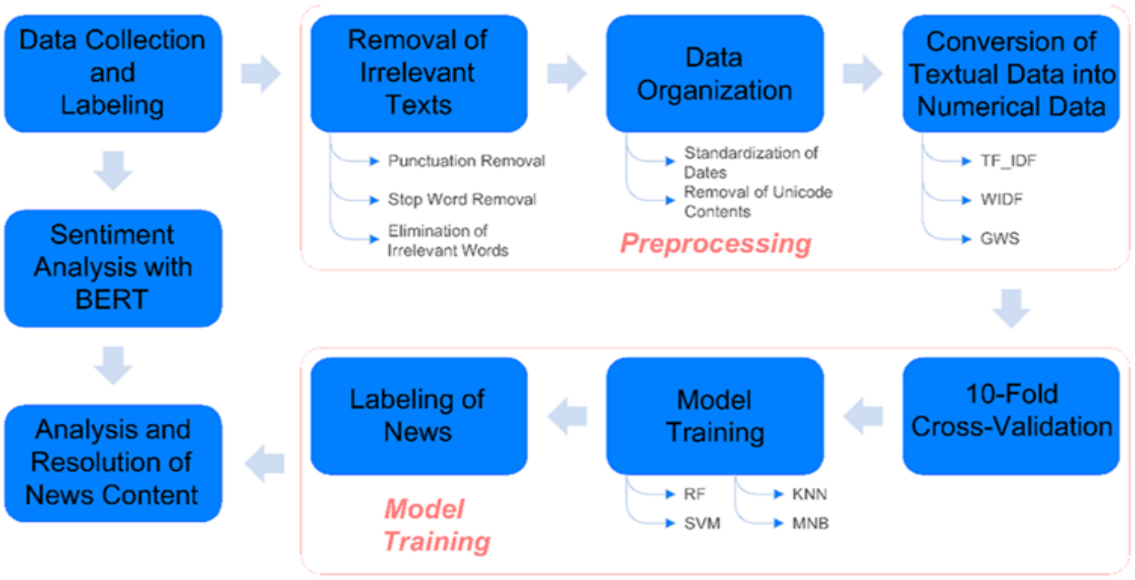


Figure 1. Model architecture.

3.1. Data collection and labelling

News content was collected from the web pages of news providers such as Fox, The Guardian, BBC, and CNN using an algorithm developed with BeautifulSoup and Selenium tools. The numbers and yearly distributions of the collected news contents are presented in Table 1. A sample from the dataset consisting of news articles spanning 2009 to 2023 is shown in Table 2. Since no news content related to Turkey was found from the news content providers prior to 2009, the news contents have been collected starting from the year 2009. Data not relevant to this study, such as news headlines, author name, have been included in the dataset to enable researchers to conduct various other studies. The dataset shared online for other researchers' use [35].

Table 1. Numbers of news collected by year.

Year	The Guardian	BBC	FOX	CNN
2009 – 2011	27	5	0	208
2012	4	3	0	525
2013	11	7	0	501
2014	10	14	11	420
2015	9	36	69	728
2016	31	47	116	830
2017	15	27	114	693
2018	16	13	121	719
2019	23	9	76	768
2020	19	13	59	402
2021	27	13	34	398
2022	54	23	85	484
2023	147	96	80	245
Total	393	306	765	6921

A subset of 750 news articles was manually labelled to ensure high-quality training data for the classification models. During this process, eight areas of interest—Erdogan, Refugees and Minorities, International Relations, Sports and Tourism, Elections, Natural Disasters and Epidemics, Terror, and Economy—were identified based on an empirical review of the labelled articles. Unlike studies that rely on predefined threshold values for classification, our approach was purely human-driven, with no automatic thresholding mechanisms. Each article was carefully reviewed and assigned a binary label (relevant or not relevant) for each area of interest according to standardized labeling criteria, which were consistently applied to minimize potential bias. This human-in-the-loop approach ensured that the predefined areas of interest accurately captured the main subjects covered in the news about Turkey, reflecting nuanced contextual relevance rather than frequency-based cutoffs. The manually labelled subset also served as a benchmark to evaluate and refine the performance of the automated classification models. Since some news items can cover more than one area of interest, these 2242 labels encompass the identified interests. In each category, half of the labels indicate relevance to the specific area, while the other half denote irrelevance. For example, in the 'International Relations' area, 302 news contents were labelled as 1 (relevant), and an equal number were labelled as 0 (irrelevant), totaling 604 labels. Table 3 shows the number of news articles according to the other labelled areas of interest.

Table 2. A sample from the dataset.

Headline	Content	Author	Date – Time	Link
Headline	Content	Author	Date – Time	Link
Biden arrives in Greece at piv…	Biden will meet with top Greek…	CNN Wire Staff	11:39 AM EST, Sun December 4, 2011	https://www.cnn...
Biden begins 4-day visit to Tur…	Biden arrives Thursday in …	CNN Wire Staff	5:39 PM EST, Thu December 1, 2011	https://www.cnn...
Turkey seeks to detain 70 offic…	ANKARA Turkey – Turkey's sta…	Associated Press	January 4, 2018 2:07am EST	https://www.fox...
Human rights row over BP…	BP and a consortium…	Paul Brown	Sat 31 Aug 2002 01.40 BST	https://www.theg...
Quiet end to Turkey's coll…	Every morning Yasemin …	Jonathan Head	31 December 2010	https://www.bbc...

Table 3. Number of labelled news articles.

Area of Interest	Count of Labeled News Articles
Erdogan	264
Refugees and Minorities	214
International Relations	604
Sports and Tourism	244
Elections	214
Natural Disaster and Epidemic	236
Terror	292
Economy	174

3.2. Preprocessing

Prior to model training, it is essential for news content to undergo several preprocessing steps. It is imperative to clean the text of content that serves no purpose for classification and to organize the data appropriately for its intended use. The primary goal at this stage is to focus on the words that can better convey the main ideas and concepts within the text. The preprocessing process has been carried out through the systematic steps presented each paragraph below.

In the news content, elements that do not contribute to the identification of the area of interest, such as author names, place names, content provider information, and details about photographs in the text (name of the photographer, location, description, and date information), have been removed. Additionally, words identified in some news contents that are not Unicode have also been eliminated. A simple algorithm has been developed to facilitate the removal of these contents.

In the text, content known only as function words, which do not convey any meaningful information and provide no valuable insight into the area of interest of the news text, has been removed. The removal of these contents utilized the default "Stop Words" removal feature of the Spacy library.

Upon examining Table 2, it is apparent that each content provider uses a different time format. To establish a temporal relationship between the news articles, these time formats have been standardized into a single format using a developed algorithm.

The presence of words that appear too frequently or infrequently in news content can affect the accuracy of classification results. For this reason, words that occur below a certain count and above a certain percentage have been removed during model training. However, since the textual content in each area of interest varies significantly, different filtering criteria have been used for each area. The criteria employed are presented in the Filtering column of Table 5.

During the digitization of textual content, feature extraction algorithms such as TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency), WIDF (Weighted Inverse Document Frequency), and GWS (Glasgow Weighting Scheme) were utilized. The results obtained were analyzed to determine the most effective method for the dataset in use, and this method was then employed in the training of the final model.

3.3. Model training

For model training, classifiers such as RF (Random Forest), SVM (Support Vector Machine), KNN (K-Nearest Neighbors), and MNB (Multinomial Naive Bayes) were utilized. The separation of training and test data employed the technique of 10-fold cross-validation. Model performance was measured using a confusion matrix from which accuracy, sensitivity, precision, and F1-Score metrics were calculated.

3.4. Analysis of news content

In this step, sentiment analysis of news content is conducted using the BERT algorithm before preprocessing, and the relationships between the labeled news contents and their publication dates are visually depicted. The goal is to measure whether the news content possesses a positive or negative sentiment using BERT, and sentiment scores are recorded accordingly. The BERT model used in this study is the pre-trained BERT-base uncased model. The model was applied without custom fine-tuning, using its default architecture and parameters. The sentiment analysis was conducted using the default BERT tokenizer and model weights to classify news sentiment as positive or negative. Since we used the pre-trained BERT-base uncased model without fine-tuning, we did not train BERT on our dataset. Therefore, calculating F1-score for BERT is not applicable in this study, as it is primarily used for sentiment classification without custom optimization. Instead, performance metrics (accuracy, precision, recall, and F1-score) were reported for the classification models that were trained on our dataset.

When using the BERT algorithm, negative and positive scores typically represent the emotional tone or semantically oriented assessment of a text. These scores are part of the transformer-based language model used to understand relationships between texts or the contexts of specific words. For instance, in text analysis, a positive score given by BERT indicates that the text generally contains positive emotions or is used in a positive context, while a negative score suggests that the text carries negative or undesirable emotions or is used in a negative context.

3.5. Performance measures

In the evaluation of classification models, the confusion matrix is utilized as a fundamental tool, encapsulating the complete performance of the model across different classes [36]. This matrix categorizes predictions into true positives, true negatives, false positives, and false negatives, thus enabling a nuanced analysis of both successes and errors in classification. An example of a confusion matrix is presented in Table 4.

Table 4. Confusion matrix.

		Actual Classes	
		Positive	Negative
Predicted Classes	Positive	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Negative	False Negative (FN)	True Negative (TN)

In Table 4, true positives (TP) occur when the model correctly predicts positive instances, while true negatives (TN) are cases where negative instances are correctly identified as such. Conversely, false positives (FP) arise when the model incorrectly predicts positive

outcomes for negative instances. False negatives (FN) occur when the model fails to identify an actual positive instance.

In assessing the performance of classification models, several key metrics are typically employed: accuracy, precision, recall, and the F1-Score, all derived from the confusion matrix. Accuracy, as presented in Equation 1, is defined as the ratio of true predictions to the total number of cases evaluated, providing an overall measure of effectiveness [36]. Precision (positive predictive value), shown in Equation 2, and recall (sensitivity), shown in Equation 3, assess the accuracy of positive predictions and the rate at which positive instances are correctly detected, respectively [37]. The F1-Score, presented in Equation 4 and calculated as a harmonic mean of precision and recall, integrates these two metrics to produce a single measure that balances their contributions, particularly valuable in situations with uneven class distributions [38].

$$Accuarcy = \frac{TP+TN}{TP+FN+FP+TN} \tag{1}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \tag{2}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \tag{3}$$

$$F1score = \frac{2*Recall*Precision}{(Recall+Precision)} \tag{4}$$

4. Results

A total of 12 different models were created using 4 different classifier algorithms and 3 different feature extractors. The results demonstrating the highest success across areas of interest have been presented in Table 5. The filtering column in the table shows the minimum and maximum word ratios excluded by each feature extractor. The first criterion mentioned indicates the number of words to be filtered based on the minimum occurrence, while the second criterion shows the ratio of words to be filtered based on their maximum occurrence. For instance, in the area of interest 'Terrorism', if a word appears 7 times or less, or more than 50% in the text content, it is removed during the model training process.

Table 5. Classification results.

Area of Interest	Classifier	Feature Extractor	acc	prec	rec	F1	Filtering (Min-Max)
Erdogan	RF	WTF	86.72	86.75	86.85	86.37	6 – 0.7
Refugees and Minorities	SVC	TF-IDF	89.74	89.85	90.55	89.52	5 – 0.6
International Relations	RF	TF-IDF	85.43	85.16	85.49	85.14	12 – 0.5
Sports and Tourism	KNN	TF-IDF	92.65	93.34	92.71	92.53	9 – 0.6
Elections	RF	TF-IDF	87.84	88.55	87.47	87.34	11 – 0.6
Natural Disaster and Epidemic	RF	TF-IDF	95.80	96.24	95.47	95.64	7 – 0.4
Terror	RF	TF-IDF	87.67	87.36	88.07	87.52	7 – 0.5
Economy	RF	TF-IDF	89.05	89.10	88.98	88.56	8 – 0.5

The model created for each area of interest was tested with numerous hyperparameters, and the optimal results are presented in Table 5. For the Random Forest algorithm, the number of trees was varied between 300 and 1500 in increments of 50. Both Gini and entropy were employed separately as criteria to measure the quality of the splits. For the SVC model, the kernels tested included linear, poly, RBF, and sigmoid. The degree of the polynomial kernel function was assessed from 3 to 30, with increments of 3. For the KNN model, the number of neighbors was tested from 4 to 20 in increments of 2. 'Uniform' and 'Distance' were evaluated separately as weight functions, and both Minkowski and Euclidean metrics were independently tested for distance computation. In this context, the necessary feature extractors, classifiers, and hyperparameters have been specified for each area of interest. Newly arriving news content will be processed through these individually determined models for each interest area, and will be labeled according to the class of the model that achieves the highest accuracy result.

The WTF feature extractor was used exclusively for the "Erdoğan" area of interest. For all other areas, the best results were achieved with the TF-IDF. For the "Erdoğan" area, the best results were obtained with a Random Forest (RF) algorithm running 1200 trees and using the "entropy" measure. For the areas of "Natural Disasters and Epidemics," "Terror," and "Elections," the best results were respectively achieved with RF algorithms using 1000, 900, and 1100 trees, all with the "entropy" measure. Similarly, for the "Economy" and "International Relations" areas, the best results were obtained with an RF algorithm running 1100 trees and using the "gini" measure. The "Refugees and Minorities" area achieved the best results with a 30-degree, linear Support Vector Classifier (SVC). For the "Sports and Tourism" area, a classifier using 18 neighbors, 'distance' weight calculation, and 'euclidean' measure was used.

Table 6. Correlation of news counts by areas of ınterest.

Area of Interest	**Erdogan**	**Refugees and Minorities**	**International Relations**	**Sports and Tourism**	**Elections**	**Natural Disaster and Epidemic**	**Terror**
Erdogan	1.00	0.62	0.78	0.42	0.52	0.17	0.77
Refugees and Minorities	0.62	1.00	0.77	0.17	0.21	0.01	0.83
International Relations	0.78	0.77	1.00	0.36	0.38	0.21	0.81
Sports and Tourism	0.42	0.17	0.36	1.00	0.33	0.45	0.15
Elections	0.52	0.21	0.38	0.33	1.00	0.72	0.22
Natural Disaster and Epidemic	0.17	0.01	0.21	0.45	0.72	1.00	0.08
Terror	0.77	0.83	0.81	0.15	0.22	0.08	1.00
Economy	0.46	0.27	0.64	0.61	0.57	0.62	0.22

In Figure 2, the relationship between the counts of news content, their publication dates, and their associated areas of interest is presented. This graph illustrates whether an increase in the number of news articles in one area of interest affects the news in other areas. Similarly, Table 6 demonstrates the correlation between different areas of interest based on the number of news articles published within the same time intervals.

Figure 3 visually represents the relationships and degrees of closeness between various areas of interest as derived from the analysis of news content. By mapping these relationships, the figure aids in identifying which areas frequently overlap in news reporting and which are distinctly segmented.

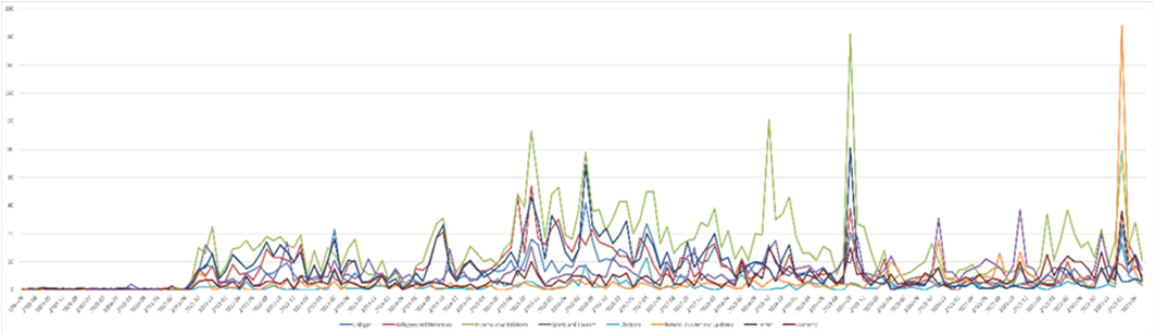


Figure 2. Relationship between news publication dates and areas of ınterest.

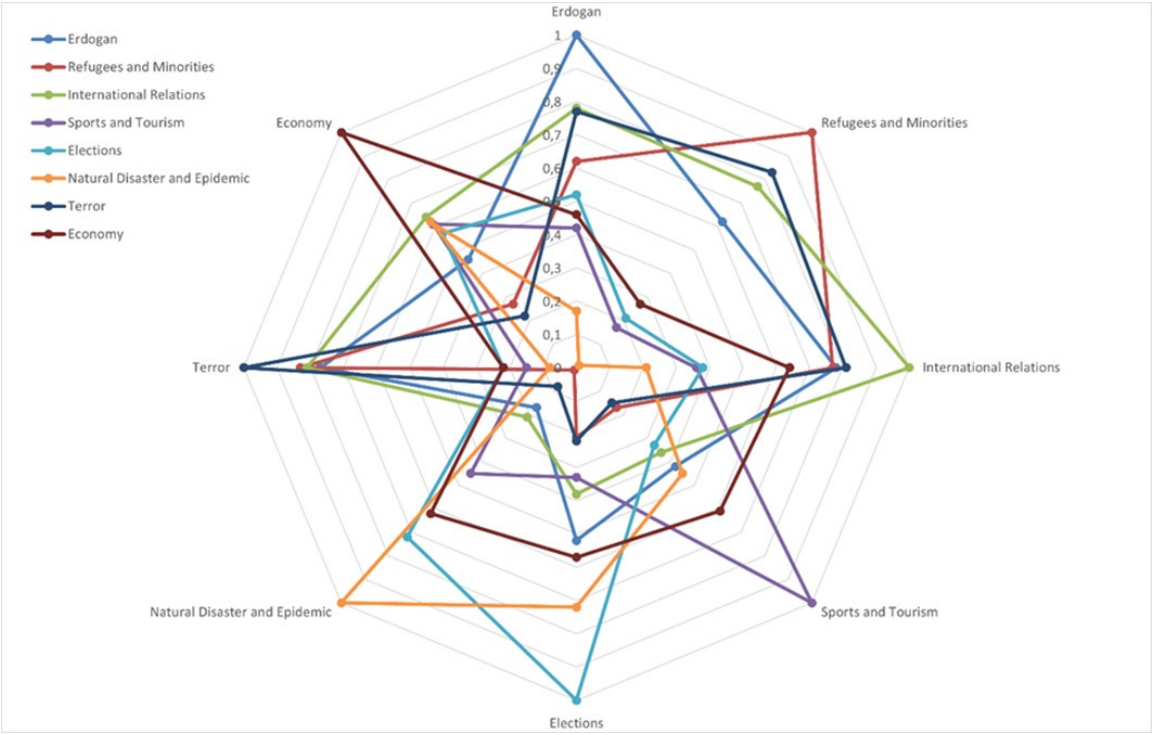


Figure 3. Proximity of areas of ınterest.

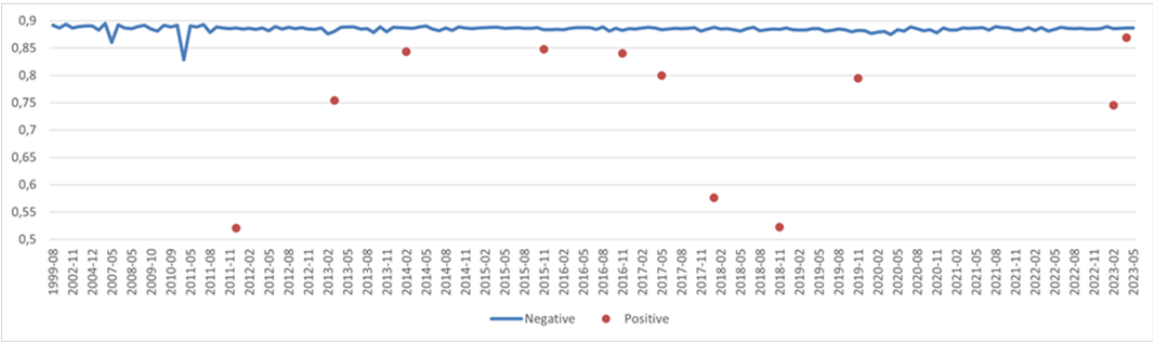


Figure 4. Analysis of BERT Sentiment Scores Over Time for News Content.

Table 7 displays the number of news articles in each area of interest along with the results obtained using the BERT algorithm. The table shows the counts of news content analyzed as negative or positive, and their average scores. The prevalence of such a high number of negative news articles in the BERT results appears as an adverse outcome. Consequently, irrespective of the area of interest, a random sample of 50 negative articles was manually read, and it was observed that even if they started positively or neutrally, they concluded with negative expressions.

Table 7. BERT Results by areas of ınterest.

Area of Interest	Number of News	Average of Negative BERT	Average of Positive BERT	Negative Number of News	Positive Number of News
Erdogan	1987	0.8855	0.7828	1984	3
Refugees and Minorities	2211	0.8868	0.7540	2210	1
International Relations	4811	0.8855	0.7041	4806	5
Sports and Tourism	1950	0.8822	0.7152	1945	5
Elections	482	0.8869	0.7997	481	1
Natural Disaster and Epidemic	915	0.8849	0.5228	914	1
Terror	2459	0.8870	0.6952	2457	2
Economy	1202	0.8836	0.7929	1200	2

Figure 4 provides a detailed visual analysis of the correlation between the sentiment scores derived from BERT and the publication dates of news content. By plotting BERT scores against the time of publication dates, the figure illustrates how perceptions of Turkey have shifted over time in the foreign press. According to the BERT algorithm, the number of news articles with positive sentiment is quite low, hence they are represented only as points on the graph. It is important to note that the BERT model was used in its pre-trained form without fine-tuning. Therefore, F1-score, which is typically calculated for trained models, is not applicable in this case. The BERT sentiment results presented here reflect direct classifications from the pre-trained model rather than performance metrics of a trained system.

5. Discussion

During the initial collection of news content, all articles containing the keywords "turkey," "türkiye," "Türkiye," "Turkey," "TÜRKİYE," and "TURKEY" were included in the dataset. However, in some of these news contents, the keyword appeared only once and the content might not be related to Turkey. Similarly, in some cases, the searched keyword could have different meanings, such as being the name of a dish. These scenarios have negatively impacted the classification success of news content according to areas of interest.

In the classification of news content according to areas of interest, separate filtering criteria, classification algorithms, and feature extractors were used due to the considerably different textual concepts present in each area. The reason for this variation in filtering rates stems from the distinctly different word structures contained in the news text according to the area of interest. Upon reviewing Table 5, it appears that the

"International Relations" area has the lowest minimum ratio. This is designed to counteract the dominance of country names in news content associated with this area of interest. Similarly, the highest maximum ratio was applied in the "Natural Disasters and Epidemics" area. The rationale behind this choice is to prevent frequently occurring words such as earthquake, COVID, pandemic, aftershock, etc., from being decisive in classification processes.

The highest classification success in the news content was achieved in the "Natural Disasters and Epidemics" area, followed by the "Sports and Tourism" area. The reason for this is the frequent use of unique words specific to these fields. The lowest success was observed in the "International Relations" area and subsequently in the "Erdoğan" area. One reason for this is that news content in these areas often consists of very general expressions. All news content was classified according to predefined areas of interest with an average accuracy rate of 89.36%.

The graph presented in Figure 2 reveals intriguing details about the relationship between the timing of news publication and the contents. The most frequently labeled news content pertains to the "International Relations" area of interest. This prevalence is expected since the web pages from which the news texts are collected are international content providers. Subsequently, the majority of news concerning Turkey has been related to terrorism. The peaks in news volume about terrorism have been shaped according to the Turkish news agenda. For example, in 2019, the most frequent period for terrorism news was in October/November, coinciding with Turkey's initiation of the "Operation Peace Spring." During these months, news worldwide concerning Turkey and terrorism reached its highest level. Another peak in terrorism-related news occurred in July/August 2016, which corresponds to the coup attempt in Turkey and its aftermath. Similarly, the "Natural Disasters and Epidemics" area saw the most news coverage during the onset of the COVID pandemic and the dates of significant earthquakes. It can be concluded that the proposed model demonstrates the effectiveness of classifying news content according to areas of interest.

When examining the correlation relationships between the numbers of news articles in various areas of interest based on publication dates (Table 6 and Figure 3), it is evident that some areas exhibit a high degree of correlation. The highest correlation exists between the "Refugees and Minorities" and "Terror" areas of interest. The next highest correlation is between the "International Relations" and "Terror" areas. This indicates that the numbers and dates of news articles published in the "Terror" area are closely linked with those in the "Refugees and Minorities" and "International Relations" areas. This situation demonstrates that news related to terrorism is directly associated with news concerning "International Relations" and "Refugees and Minorities." In other words, an increase in the number of news articles in one of these areas directly affects the other. Additionally, the "Sports and Tourism" area has almost no correlation with any other area, which is likely due to the nature of the content in this area being significantly different from others. The lowest correlation is between the "Natural Disasters and Epidemics" area and the "Refugees and Minorities" area, attributed to the very low relational linkage between news in these areas.

Upon examining Table 7 and Figure 4, it is apparent that the sentiment analysis results conducted on news content using the BERT algorithm are predominantly negative. The number of news articles with positive sentiment is negligibly small, and the scores of

those few positive cases are quite low. This is true even for news in the "Sports and Tourism" areas of interest. In this context, it can be asserted that almost all news related to Turkey is perceived negatively. Upon reviewing the news content, it has been observed that even content normally expected to be positive eventually changes tone, incorporating negative sentences that alter the sentiment of the piece.

Table 8. Related works and presented study.

Study	Purpose	Method
Hassani and colleagues [3]	To explore the potential applications of text mining in big data analytics.	Suggestions for successful news content analysis using text mining.
Leonard and colleagues [11]	To classify news content based on headlines.	SVC model achieved 90% accuracy compared to LR, MNB, Decision Tree, and RF.
Agarwal and colleagues [12]	To classify news based on areas of interest.	RF, Decision Tree, KNN, Gaussian Naive Bayes; RF achieved 91.94% accuracy.
Sadjadi and colleagues [13]	To classify news using both labelled and unlabeled data.	Semi-supervised model with accuracy of 77.3% to 81.92%.
Miao and colleagues [14]	To classify Chinese news content.	TF-IDF + KNN, NB, SVM; highest F1-Score with SVM at 95.7%.
Salehin and associates [15]	To classify Bangla news based on publisher's categories.	Multiple ML models; LSTM achieved 87% accuracy.
Lin and colleagues [16]	To detect harmful news using sentiment analysis.	BERT-based model with F1-score of 66.3%.
Hayawi and colleagues [17]	To perform sentiment analysis on COVID-19 news.	XGBoost, LSTM, BERT; BERT achieved 98% accuracy.
Ahmet et al. [19]	To review approaches for online news classification based on publisher's categories.	Bayesian classifier with 93% accuracy.
Proposed Study	To classify news based on areas of interest and analyze Turkey's image in the foreign press through sentiment analysis	BERT for sentiment, RF, KNN, SVM, MNB for classification

To clarify the contributions of this study and distinguish it from previous works, Table 8 presents a comparative analysis of related studies in the field of text mining, news classification, and sentiment analysis. While prior research has primarily focused on categorizing news content based on predefined publisher-driven classifications, this study offers a novel approach by integrating sentiment analysis with topic-based classification specific to Turkey's image in the foreign press. The table highlights the objectives, methodologies, and key findings of existing works, emphasizing the unique aspects of our study and how it addresses the gaps in the literature.

In the literature, the primary use of the BERT algorithm on news content has been observed for the purpose of detecting fake news. A conclusion drawn from similar studies in this area is that sentiment analysis of news content using BERT is quite successful.

Many studies related to the classification of news content are also evident. However, it has generally been found that these studies classify news content according to categories provided by the publisher. In this study, however, news content has been grouped according to areas of interest. The categorization provided by the publisher and the areas of interest convey different meanings in the grouping of news content. While the category typically shows the subject of the news content, the area of interest represents the significance conveyed by the content rather than just the subject. For example, a news item labeled "International Relations" would cover stories about Turkey's relations with other countries. Thus, a sports news item would be included in this area if it is of an international level, but not if it is on a local level. Similarly, an economic content piece would have the "International Relations" tag if it is based on relations between Turkey and other countries or concerns the economy of other countries.

The predominance of negative sentiment in news content as identified by BERT suggests a potential bias in foreign media's portrayal of Turkey. This finding aligns with previous studies indicating that international news coverage often emphasizes conflict-oriented narratives. Addressing this bias in future research could involve expanding the dataset to include more neutral sources and exploring advanced sentiment analysis techniques.

6. Conclusion

In this study, a comprehensive dataset consisting of 8,385 news contents related to Turkey was collected from four different sources and shared online for other researchers' use [35]. The purpose of the study is to analyze the perception of Turkey in the foreign press and to examine the relationships between the publication dates of news contents across different areas of interest. In this context, the study focused on classifying news contents according to their areas of interest, extracting relationships based on their publication dates, and performing sentiment analysis using the BERT algorithm. During the digitization process of the news contents, three different feature extractors—TF-IDF, WIDF, and GSW—were used, and various classifiers such as RF, KNN, MNB, and SVM were employed in the model development process. Considering each area of interest independently, models that would yield the best results were created using different feature extractors, classifiers, and hyperparameters for each area. An average accuracy of 89.36% was achieved in the classification of news contents according to their areas of interest. The sentiment results from the BERT analysis of almost all news contents were found to be negative. Intriguing correlations and connections have been discovered between the publication dates of news contents belonging to different areas of interest.
In subsequent phases, the study can be expanded to include more datasets. By analyzing news content from different countries, the changes in the perception of Turkey in the foreign press over the years can be comparatively studied across various nations.

While the study provides valuable insights into the portrayal of Turkey in foreign media, it is limited by the scope of its dataset and the predominance of negative sentiment. Future research could focus on expanding the dataset to include more diverse sources and applying alternative sentiment analysis models to validate the findings. Additionally, exploring temporal changes in sentiment could further clarify trends in media portrayal.

References

[1] Austin, C., and Kusumoto, F., The application of Big Data in medicine: current implications and future directions, **Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology**, **47**, 51-59, (2016)

[2] Rana, M.I., Khalid, S., and Akbar, M.U., News classification based on their headlines: A review, **17th IEEE International Multi Topic Conference 2014**, (2014)

[3] Hassani, H., Beneki, C., Unger, S., Mazinani, M.T., and Yeganegi, M.R., Text mining in big data analytics, **Big Data and Cognitive Computing**, **4**, 1, 1, (2020)

[4] Kaur, G., and Bajaj, K., News classification and its techniques: a review, **IOSR Journal of Computer Engineering**, **18**, 1, 22-26, (2016)

[5] Dadgar, S.M.H., Araghi, M.S., and Farahani, M.M., A novel text mining approach based on TF-IDF and Support Vector Machine for news classification, **2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)**, (2016)

[6] Ghomi, H., and Hussein, M., An integrated text mining, literature review, and meta-analysis approach to investigate pedestrian violation behaviours, **Accident Analysis & Prevention**, **173**, 106712, (2022)

[7] Gomes, H., de Castro Neto, M., and Henriques, R., Text Mining: Sentiment analysis on news classification, **2013 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)**, (2013)

[8] Zhang, X., and Li, W., From social media with news: Journalists' social media use for sourcing and verification, **Journalism Practice**, **14**, 10, 1193-1210, (2020)

[9] Cetina Presuel, R., and Sierra, J.M.M., Algorithms and the news: social media platforms as news publishers and distributors, **Revista De Comunicación**, **18**, 2, 261-285, (2019)

[10] Carreira, R., Crato, J.M., Gonçalves, D., and Jorge, J.A., Evaluating adaptive user profiles for news classification, **Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces**, (2004)

[11] Leonard, G., Sisnadi, F., Wardhana, N.V., Al-Ghofari, M.A.A., and Girsang, A.S., News Classification Based On News Headline Using SVC Classifier, **2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)**, (2022)

[12] Agarwal, J., Christa, S., Pai, A., Kumar, M.A., and Prasad, G., Machine learning application for news text classification, **2023 13th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)**, (2023)

[13] Sadjadi, S., Mashayekhi, H., and Hassanpour, H., A two-level semi-supervised clustering technique for news articles, **International Journal of Engineering**, **34**, 12, 2648-2657, (2021)

[14] Miao, F., Zhang, P., Jin, L., and Wu, H., Chinese news text classification based on machine learning algorithm, **2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)**, (2018)

[15] Salehin, K., Alam, M.K., Nabi, M.A., Ahmed, F., and Ashraf, F.B., A comparative study of different text classification approaches for bangla news classification, **2021 24th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)**, (2021)

[16] Lin, S.-Y., Kung, Y.-C., and Leu, F.-Y., Predictive intelligence in harmful news identification by BERT-based ensemble learning model with text sentiment analysis, **Information Processing & Management**, **59**, 2, 102872, (2022)

[17] Hayawi, K., Shahriar, S., Serhani, M.A., Taleb, I., and Mathew, S.S., ANTi-Vax: a novel Twitter dataset for COVID-19 vaccine misinformation detection, **Public health**, **203**, 23-30, (2022)

[18] To, Q.G., To, K.G., Huynh, V.-A.N., Nguyen, N.T., Ngo, D.T., Alley, S.J., Tran, A.N., Tran, A.N., Pham, N.T., and Bui, T.X., Applying machine learning to identify anti-vaccination tweets during the COVID-19 pandemic, **International journal of environmental research and public health**, **18**, 8, 4069, (2021)

[19] Ahmed, J., and Ahmed, M., Online news classification using machine learning techniques, **IIUM Engineering Journal**, **22**, 2, 210-225, (2021)

[20] MAHAJAN, S., and Ingle, D., News classification using machine learning, **Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun**, **9**, 5, 23-27, (2021)

[21] Sunagar, P., Kanavalli, A., Nayak, S.S., Mahan, S.R., Prasad, S., and Prasad, S., News Topic Classification Using Machine Learning Techniques, **International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems: Proceedings of ICCCES 2020**, (2021)

[22] Fanny, F., Muliono, Y., and Tanzil, F., A comparison of text classification methods k-NN, Naïve Bayes, and support vector machine for news classification, **Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT**, **3**, 2, 157-160, (2018)

[23] Nwet, K.T., and Darren, S., Machine learning algorithms for Myanmar news classification, **International Journal on Natural Language Computing (IJNLC)**, **8**, 4, (2019)

[24] Keya, A.J., Wadud, M.A.H., Mridha, M., Alatiyyah, M., and Hamid, M.A., AugFake-BERT: handling imbalance through augmentation of fake news using BERT to enhance the performance of fake news classification, **Applied Sciences**, **12**, 17, 8398, (2022)

[25] Shishah, W., Fake news detection using BERT model with joint learning, **Arabian Journal for Science and Engineering**, **46**, 9, 9115-9127, (2021)

[26] Mehta, D., Dwivedi, A., Patra, A., and Anand Kumar, M., A transformer-based architecture for fake news classification, **Social network analysis and mining**, **11**, 1-12, (2021)

[27] Sparck Jones, K., A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval, **Journal of documentation**, **28**, 1, 11-21, (1972)

[28] Takenobu, T., Text categorization based on weighted inverse document frequency, **Information Processing Society of Japan, SIGNL**, **94**, 100, 33-40, (1994)

[29] Sabbah, T., Selamat, A., Selamat, M.H., Al-Anzi, F.S., Viedma, E.H., Krejcar, O., and Fujita, H., Modified frequency-based term weighting schemes for text classification, **Applied Soft Computing**, **58**, 193-206, (2017)

[30] Breiman, L., Random forests, **Machine learning**, **45**, 5-32, (2001)

[31] Boser, B.E., Guyon, I.M., and Vapnik, V.N., A training algorithm for optimal margin classifiers, **Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory**, (1992)

[32] Fix, E., and Hodges, J.L., Discriminatory analysis, nonparametric discrimination, (1951)

[33] McCallum, A., and Nigam, K., A comparison of event models for naive bayes text classification, **AAAI-98 workshop on learning for text categorization**, (1998)

[34] Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., and Toutanova, K., Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, **arXiv preprint arXiv:1810.04805**, (2018)

[35] ISIK, M., and AYDEMİR, E., News about Turkey from BBC, CNN, TG, and FOX. (2024)

[36] Fawcett, T., An introduction to ROC analysis, **Pattern recognition letters**, **27**, 8, 861-874, (2006)

[37] Powers, D.M., Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation, **arXiv preprint arXiv:2010.16061**, (2020)

[38] Takahashi, K., Yamamoto, K., Kuchiba, A., and Koyama, T., Confidence interval for micro-averaged F 1 and macro-averaged F 1 scores, **Applied Intelligence**, **52**, 5, 4961-4972, (2022)

DOI:10.25092/baunfbed. 1628991 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 587-608, (2025)*

Geri dönüşüm makinelerinde kullanılan kesme silindirinin elastik davranışının parametrik korelasyon yöntemi ile analizi ve optimizasyonu

Özer ÖĞÜÇLÜ[1,*], Oğuz Emrah TURGUT[2]

[1]*Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Akıllı Sistemler Mühendisliği, İzmir.*
[2]*Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, İzmir.*

Geliş Tarihi (Received Date): 29.01.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 17.04.2025

Öz

Bu çalışmada EM1600 eğik makasta kullanılan kalın duvarlı kesme silindirinin sahadaki çalışma koşullarının tasarımı ve parametrik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. SolidWorks yazılımında tasarımı yapılan eğik makasın kesme silindirinin üç boyutlu katı modeli basitleştirilerek sonlu elemanlar analizlerinin yapılması için ANSYS yazılımına aktarılmıştır. Kalın duvarlı kesme silindirinde kullanılan hidrolik yağın sıcaklık ve basınç parametrelerinin sahadaki çalışma şartları değerlerine uygun olarak analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda kesme silindirinin kalın duvarında oluşan radyal gerilme, eksenel gerilme ve teğetsel gerilme ile toplam şekil değiştirme değerleri bulunmuştur. Bu üç gerilme değeri kullanılarak kesme silindirinin elastik davranışını belirlemek için von Mises eşdeğer gerilme değeri hesaplanmıştır. Bu çalışmada girdi parametresi olarak kesme silindirinde bulunan hidrolik yağın sıcaklık ve basınç değerleri seçilmiştir. Bununla birlikte çıktı parametresi olarak von Mises eşdeğer gerilmesi ile toplam şekil değiştirme ve kesme silindirinin sağladığı kesme kuvveti tanımlanmıştır. Bu parametreler kullanılarak, Parametrik Korelasyon Yöntemi ile ANSYS yazılımında çok amaçlı optimizasyon işlemi yapılmıştır. Bunun için toplam şekil değiştirme ve von Mises eşdeğer gerilme değerleri kısıt olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin en küçük değerlerinin bulunması amaçlanmış, kesme kuvveti çıktı parametresi ise hedef olarak belirlenmiş ve en büyük değerinin bulunması amaçlanmıştır. Kesme kuvvetinin belirlenen sınırlar içinde kalan en büyük değeri olan 7.9 x 10^6 N için yapılan optimizasyon çalışması ile en uygun sıcaklık; 42.94 ^oC ve basınç; 34.73 MPa olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: *Geri dönüşüm, sonlu elemanlar yöntemi, kesme silindiri, deney tasarımı, parametrik korelasyon, optimizasyon.*

[*]Özer ÖĞÜÇLÜ, ozeroguclu@hotmail.com, http://orcid.org/0000-0002-6293-7742
Oğuz Emrah TURGUT, oguzemrah.turgut@bakircay.edu.tr, http://orcid.org/0000-0003-3556-8889

Analysis and optimization of elastic behavior of cutting cylinder used in recycling machines with parametric correlation method

Abstract

In this study, design and parametric optimization of the field operating conditions of thick-walled cylinder used in the EM1600 inclined shear was achieved. Three-dimensional solid model of thick-walled cylinder which was designed and simplified in SolidWorks software, was transferred to ANSYS software for finite element analysis. The analysis of thick-walled cylinder was achieved according to the temperature and pressure parameters of inclined shear in plants. As a result of the analysis, radial, axial and hoop stresses and total deformation results in thick-walled cylinder were obtained. To calculate elastic behaviour of the cylinder, von Mises equivalent stress was additionally calculated using these three stresses. In this study, the temperature and pressure parameters of hydraulic oil employed in cylinder of inclined shear were selected as input parameters. In addition, total deformation, von Mises equivalent stress, and cutting force supplied by inclined shear cylinder were defined as output parameters. With the use of these parameters, a multi-objective optimization was performed in ANSYS with the help of Parametric Correlation. Total deformation and von Mises equivalent stress were defined as the constraints and the minimum values of these parameters were requested. Conversely, shear force was chosen as the target, and the maximum force value was requested. Optimum temperature was yielded as 42.94 ^{o}C, and optimum pressure was yielded as 34.73 MPa for maximum shear force: 7.9 x 10^{6} N within the specified limits.

Keywords: *Recycling, finite element method, cutting cylinder, design of experiments, parametric correlation, optimization.*

1. Giriş

Geri dönüşüm; kullanım dışı kalan ve geri dönüştürülebilir olan çeşitli atık ve hurda malzemelerin farklı geri dönüşüm yöntemleri ile ham madde olarak yeniden imalat işlemlerine kazandırılması olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu tanıma göre metal geri dönüşümü işlemi; hurda metallerin farklı işlemler uygulayarak tekrar kullanılabilecek hale getirilmesi ile başarılmaktadır. Geri dönüşüme girecek olan malzemenin türüne göre bu amaç için kullanılan makineler farklı yapılarda ve çeşitlerde olabilmektedir. Metal hurda malzemeler bu amaç için üretilmiş olan metal geri dönüşüm makinelerinde hidrolik kuvvetlerin etkisi altında sıkıştırılır ve balya haline getirilir veya kesilerek ya da parçalanarak daha küçük boyutlara düşürülür. Geri dönüşüm makinelerinin üretiminde; işletme ve çalışma ihtiyaçlarının belirlenmesi ve bu ihtiyaçlara göre mekanik ve hidrolik olarak hesaplamaların yapılması gerekmektedir.

Fonksiyonel amaçları karşılayabilmek için üretilen makinelerde ve makine parçalarında ihtiyaçlara göre tasarım değişikliği ve çeşitliliği artış gösterebilmektedir. Tasarım değişikliklerinin fazla olması zaman kaybına ve mühendislik maliyetinin artışına sebep olmaktadır. Günümüzde bazı ürünlerin parametrik tasarım uygulamaları sayesinde tasarımları hızlı olarak yapılabilmekte ve maliyet azaltılabilmektedir. Ayrıca tasarımların parametrik şekilde uygulanması tasarımların dengeli bir şekilde çıkmasından dolayı verimlilikte bir artış göstermektedir. Bu sebeple müşteri talepleri veya buna benzer başka

ihtiyaçlar nedeni ile tasarım değişiklerinin fazla olması makine üretiminde parametrik tasarım uygulamalarının geliştirilmesinde önem kazanmaktadır.

Ayyıldız ve ark. [2] yaptıkları çalışmada dişli çark ve dişli çark çiftlerinin parametrik olarak çizimi ve modelinin yapılması için bilgisayar destekli tasarım ortamında bir yazılım geliştirmişlerdir. Bu yazılımı kullanarak dişli çark veya dişli çark çiftlerinin boyutlarını bulmak amacı ile diş sayısı, modül, iletim oranı değişkenleri kullanıcılar tarafından yazılıma girilmiş daha sonra bilgisayar destekli tasarım ortamında dişli çark çizimleri veya modelleri otomatik bir şekilde yapılmıştır.

Sırmalılar ve ark. [3] yaptıkları çalışmada debriyaj üretimi yapan bir işletmede ardışık olarak üretilen bir volanın üretim maliyetini düşürmek için boyut iyileştirilmesi gerçekleştirmiştir. Bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak volanın sahada çalışma koşullarının benzetimi yapılmış, volan için gerekli olan mekanik özellikleri yerine getirmek ve bunun yanında volanın üretim maliyetini azaltacak şekilde parametreye dayalı optimizasyon yöntemi ile iyileştirme çalışması yapılmıştır.

Sabuncuoğlu ve Demirtaş [4] yaptıkları çalışmada yüksek performans ve çalışma verimliliği ile geleneksel yaylara göre tercih edilebilen işleme helisel yayların yay sabitinin belirlenmesi için bir yapay sinir ağı geliştirme yöntemi sunmuşlardır. Yapay sinir ağı eğitimi için ilk olarak çeşitli boyutsal parametrelerle sonlu eleman analizleri yapılmış ve elde edilen yay sabiti değerleri tasarlanan deney düzeneğinde gerçekleştirilen testlerle doğrulanmıştır. Doğrulanan sonlu eleman sonuçları ile parametrik korelasyon analizli yapılmış ve her yay boyutsal parametresinin yay sabiti üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Gündoğdu [5] yaptığı çalışmada; dış rotorlu ve yüzeye bağlı mıknatıslara sahip bir Vernier makinenin tüm geometrik parametrelerinin başarım karakteristiklerine olan etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Moment, verim ve indüklenen gerilimi en çok etkileyen geometrik tasarım parametreleri belirlenmiş ve parametrik olarak en iyi tasarım elde edilmiştir. Analizler zaman adımlı, doğrusal olmayan, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi tabanlı bir program ile gerçekleştirilmiştir.

Asker ve Günerhan [6] yaptıkları çalışmada öncelikle faz değişim malzemeli ısı değiştiricinin tasarımına ilişkin sayısal bir yöntem geliştirmiş ve elde ettikleri sonuçları daha önce yapılan bir analitik yöntemin sonuçları ile karşılaştırmıştır. Daha sonra, faz değişim malzemeli ısı değiştiricinin hacmi sabit tutulmuş ve sistem üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır. Boru aralığı değişimi, hava debisi değişimi ve faz değişim malzemesi değişken parametreler olarak ele alınmıştır.

Aydın ve ark. [7] yaptıkları çalışmada dönmeyen lastiksiz Solaris 10 güneş arabası jantının 2018 ve 2019 modellerinin doğal frekanslarını serbest sınır koşulları altında darbe çekici testi ile deneysel olarak belirlemiş ve sonuçları ANSYS sonlu elemanlar analiz yazılımında elde edilen doğal frekans sonuçları ile karşılaştırmıştır. ANSYS modal analiz modülünde gözlemlenen mod şekilleri, yüksek genlik oluşturabilecek doğal frekanslar için gösterilmiştir. 2019 Jant modeli için parametrik bilgisayar destekli tasarım modeli kullanılarak bir tasarım optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Böylece ANSYS sonlu elemanlar analizi yazılımında parametrik çalışma ile daha hafif bir jant elde edilmiş ve maksimum eşdeğer von Mises gerilmesinin 120 MPa'nın altında kalması sağlanmıştır.

Özden ve Gökçe [8] yaptıkları çalışmada insan veya yük taşımak için tasarlanan bir kara aracının, arazi açıları, birden çok kişilik kullanımı ve farklı fonksiyonel ihtiyaçları için şasinin uzunluğu, yüksekliği ve genişliği ana değişkenler olmak üzere 17 adet değişkeni parametrik tasarım arayüzünde tanımlamıştır. Aracın önden çarpma, yanal çarpma ve şasinin burulması konfigürasyonları için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Aracın genel yapı itibariyle emniyetli olduğu belirlenmiş ve optimum tasarıma göre aracın üretimi gerçekleştirilmiştir.

Celen ve Kaba [9] gerçekleştirdikleri çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryalardan oluşan bir batarya grubunu göz önüne almış ve bataryaların havayla ve elektriksel olarak yalıtkan olan sıvıyla soğutulmasını parametrik olarak incelemiştir. Akışkan giriş sıcaklığının, farklı deşarj hızlarında bataryada meydana gelen ısı üretiminin ve Reynolds sayısının ortalama batarya sıcaklığına ve basınç kaybına etkisi araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonunda hava sıcaklığının 15 ^{o}C üzerine çıktığı hava şartlarında doğrudan soğutmanın yeterli olmadığı bu sebeple sıvı soğutmanın kullanılmasının gerekli olduğu belirlenmiştir.

Kocaaslan ve ark. [10] yaptıkları çalışmada bir döndürücüye ait kanat sayısı, kanat sarım açısı ve kanat uzunluğu ile yakıt giriş çapının yanma odasındaki türbülanslı akış yapısı, yanma verimi ve emisyon değerleri üzerine etkisini araştırmıştır. Sayısal çalışmalar ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve referans alınan deneysel çalışmaya uygun olarak önceden karışmamış yanma modeli tanımlanmıştır. Sayısal yöntem, elde edilen verilerin deneysel veriler ile karşılaştırılması ile doğrulanmıştır. Analizler sonucu olarak kanat sarım açısının alev şekli, kanat uzunluğunun ise alevin simetrik yapısı üzerine önemli etkisinin olduğu bulunmuştur.

Çetin [11] gerçekleştirdiği çalışmada kompresör basınç oranı, çevre sıcaklığı, türbin izentropik verimi ve kompresör izentropik verimini değişken parametre olarak alarak, basit Brayton çevrimi için elektrik enerjisi üretimi maliyetinin parametrik analizini yapmıştır. Yapılan incelemelerde, diğer parametreler sabit kabul edilmiş ve bütün termodinamik ve ekonomik ifadeler bu karar değişkenlerinin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan model çözümlenmiş ve elektrik üretimi maliyetini minimum yapan en uygun işletme şartları belirlenmeye çalışılmıştır.

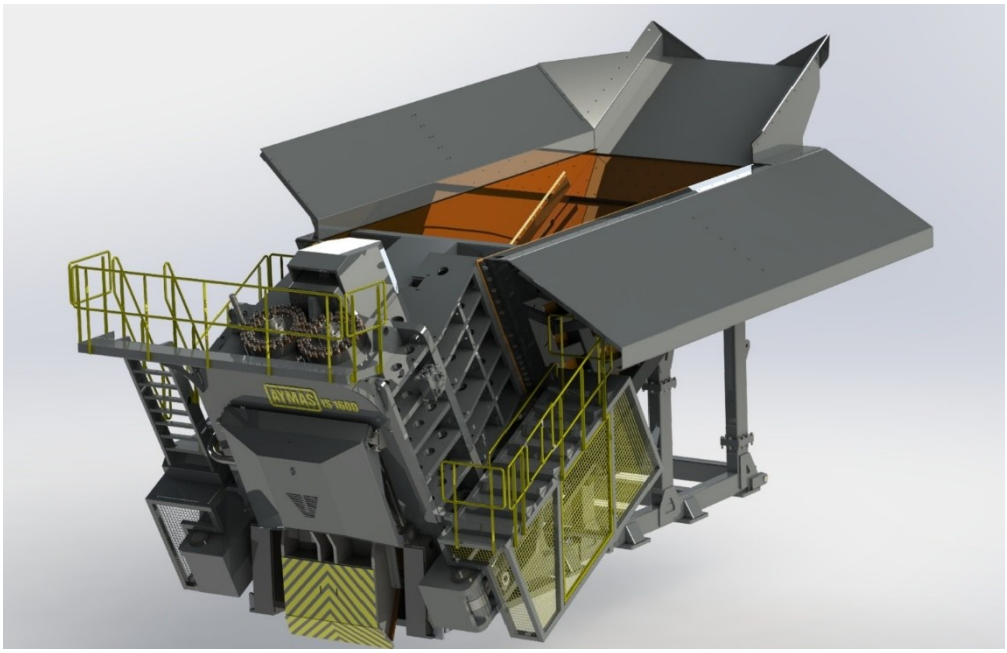
Günümüzde soğutmaya ihtiyaç duyan elektronik cihazların minyatürleşmesi mikro kanallarda akış ve ısı karakteristiği üzerine yapılan çalışmaları artırmıştır. Çelik ve Parlak [12] yaptıkları çalışmada, dikdörtgen kesite sahip tek bir mikro kanal içerisine, farklı yerleşim düzenlerinde dikdörtgen kanatçıklar yerleştirmiştir. Temel akışkan su seçilerek, mikro kanalda akış ve ısı geçişi özellikleri incelenmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi, ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, basınç düşümünün ve Nusselt sayısının, artan Reynolds sayısı ve kanal içine yerleştirilen kanatçıklar ile arttığını göstermiştir.

Makine, havacılık ve otomotiv sanayi gibi mühendislik uygulamalarında oldukça sık kullanılan silindirik makine elemanları, yüksek sıcaklık ve basınç etkisi altında çalışmaktadır ve bu yüzden mekanik analizi ve tasarımı üretim açısından önemli konular arasında bulunmaktadır. Silindirik elemanların elastik ve elastik sınır davranışlarının bulunması tasarım ve maliyet açısından oldukça önemli bir konudur [13].

Bu çalışmada Aymas Geri Dönüşüm Makineleri Firmasında üretilen EM1600 eğik makasın kalın duvarlı kesme silindirinin tasarımı ve parametrik optimizasyonu yapılmıştır. Bu amaç ile EM1600 eğik makasın işletmelerdeki çalışma şartlarını dikkate alarak kesme silindirlerinde bulunan hidrolik yağa ait sıcaklık ve basınç değerleri ANSYS'de girdi parametresi olarak belirlenmiştir. Bunun yanında silindirin kalın duvarlarında oluşan radyal, eksenel ve teğetsel gerilmelerin kullanılması ile bulunan von Mises eşdeğer gerilmesi ve toplam şekil değiştirmesi ile birlikte EM1600 eğik makasın kesme silindirlerinden elde edilen kesme kuvveti de ANSYS'de çıktı parametreleri olarak seçilmiştir. Parametrik Korelasyon Yöntemi yardımı ile bu parametreler kullanılarak ANSYS yazılımında yapılan çok amaçlı iyileştirme süreci için toplam şekil değiştirmesi ile von Mises eşdeğer gerilmesi kısıt olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin en küçük değerinin hesaplanması istenmiş, silindir pistonlarının kesme kuvveti ise hedef olarak belirlenmiş ve en büyük değerinin hesaplanması istenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile söz konusu şartları yerine getiren ve girdi parametresi olarak seçilen kesme silindirlerinde yer alan hidrolik yağın sıcaklık ve basınç parametrelerinin kabul edilen kısıtlara uyan en uygun değerleri bulunmuştur.

2. Eğik makas kesme silindiri modeli

Eğik hurda kesme makasları, metal geri dönüşüm çalışmalarında büyük boyutlu metal hurdaların sıkıştırılarak ve sonra kesilerek daha küçük boyutlu metal hurdaların üretilmesi için kullanılmaktadır. Metal hurda yüklenen haznenin tabanının eğik olması sayesinde hurdalar kendi ağırlıkları ile makas içinde ilerlemektedir. Şekil 1'de eğik makas genel görünüşü verilmiştir. Hurdaların sıkıştırılması ve kesilmesi işlemlerini uygulayan mekanizmaların tümü eğik makas gövdesi üzerinde birlikte bulunmaktadır. EM1600 eğik makas metal hurda malzemeleri kesme amacı kullanılmaktadır. Ağır iş çelikleri, boru, sac, otomobil ve karışık hurdalar eğik makasta kesilmesi uygun olan metal malzemeler olmaktadır.



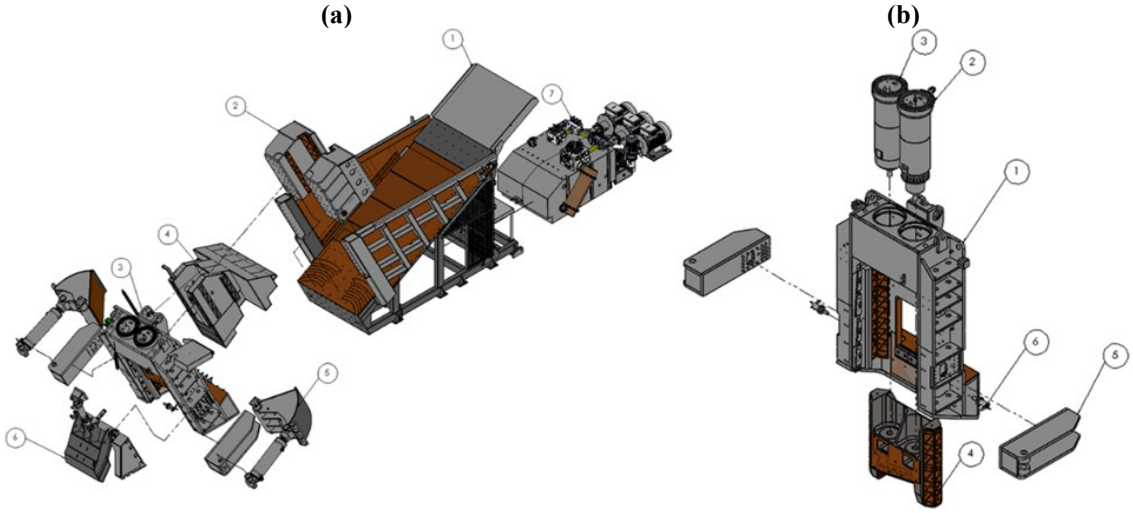
Şekil 1. Eğik hurda makası genel görünüşü [14].

EM1600 eğik makasın ölçüleri, uzunluk; 11 m, genişlik; 5 m ve yükseklik; 4 m'dir. Ayrıca eğik makasın diğer teknik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir [14].

Tablo 1. EM1600 eğik makas teknik özellikleri.

Model	Kesme Kuvveti	Kesme Sayısı	Kapasite	Ağırlık
EM1600	1600 Ton	2-3 Adet/dk	70 Ton/saat	160 Ton

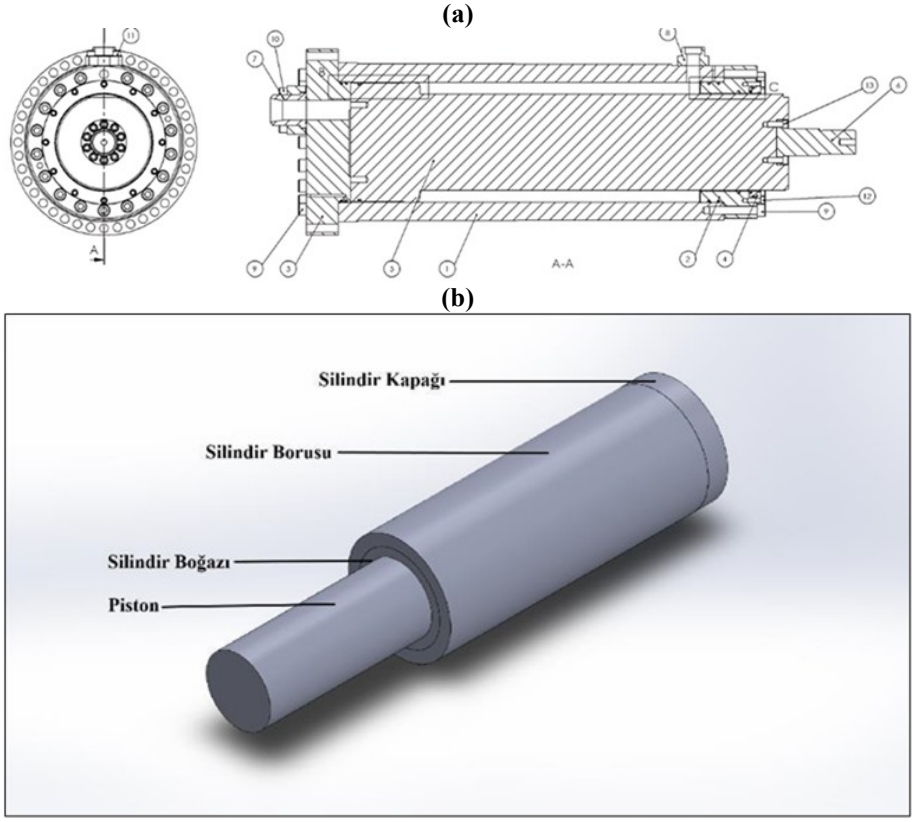
Eğik makas, Şekil 2 (a)'da görüldüğü üzere; (1) kayar taban ve hazne grubu, (2) yan kılavuz duvarlar, (3) kesme grubu, (4) tutucu grubu, (5) sıkıştırma grubu, (6) boy ayarlama grubu ve (7) hidrolik ünite ve motor grubu ile toplam yedi gruptan oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 2 (b)'de verilen eğik makas kesme grubu; (1) taşıma gövdesi, (2) ve (3) kesme silindirleri, (4) giyotin, (5) sıkıştırma silindiri koruması ve (6) kilit mekanizması olmak üzere altı parçadan oluşmaktadır. Hurda malzemeler eğik makas haznesi içine boşaltılır sonra kayar taban ve yer çekimi etkisi ile bu malzemeler aşağı doğru hareket eder. Önce istenen ölçüde boy ayarlama işlemi gerçekleştirilir. Haznenin en alt bölgesine gelen hurda malzeme tutucu grubu ile tutulur sonra her iki yanda bulunan sıkıştırma grubu ile hurda malzeme sıkıştırılır. En son olarak kesme grubunda bulunan iki adet kesme silindirine bağlı giyotin bıçakları aşağı doğru hareket ederek ayarlanan boy ölçüsüne uygun olarak hurda malzemenin kesme işlemini gerçekleştirir [15].



Şekil 2. Eğik hurda makası (a) parça grupları ve (b) kesme grubu parçaları [15].

Burada gerçekleştirilen çalışma ile EM1600 eğik makas kesme grubunda bulunan kalın duvarlı kesme silindirlerinde çalışan hidrolik yağın sıcaklık ve basınç şartları değiştirilerek radyal, eksenel ve teğetsel gerilmelerin değişimlerinin incelenmesi sonlu elemanlar analizleri ile yapılmıştır. İlk olarak SolidWorks yazılımında tasarımı yapılan ve Şekil 3 (a)'da kesit görünüşü verilen kesme silindirinin basitleştirilmiş üç boyutlu katı modelini elde etmek için; silindir kapağı ile silindir borusu bağlantı cıvataları ve silindir boğazı ile silindir borusu bağlantı cıvataları katı modelinden çıkarılmıştır. Daha sonra yapılan ANSYS modelinde bu bağlantılar; bağlı (bonded) sınır şartı ile belirtilmiştir. Ayrıca piston başı yan yüzü ile silindir borusu iç yüzeyi arasındaki sızdırmazlık elemanları ile yine piston mili ile silindir boğazı arasındaki sızdırmazlık elemanları katı modelden çıkarılmıştır. ANSYS modelinde bu bağlantılar; sürtünmeli (frictional) olarak belirtilmiştir. En son olarak silindir ile hidrolik yağ hat bağlantıları katı modelden

çıkartılarak Şekil 3 (b)'de verilen kesme silindiri basitleştirilmiş üç boyutlu katı modeli elde edilmiştir. Bu model sonlu elemanlar analizleri için ANSYS workbench yazılımına içe aktarma (import) komutu ile aktarılmıştır.



Şekil 3. Eğik makas kesme silindiri (a) ön ve yan kesit görünüşü ve (b) basitleştirilmiş modeli.

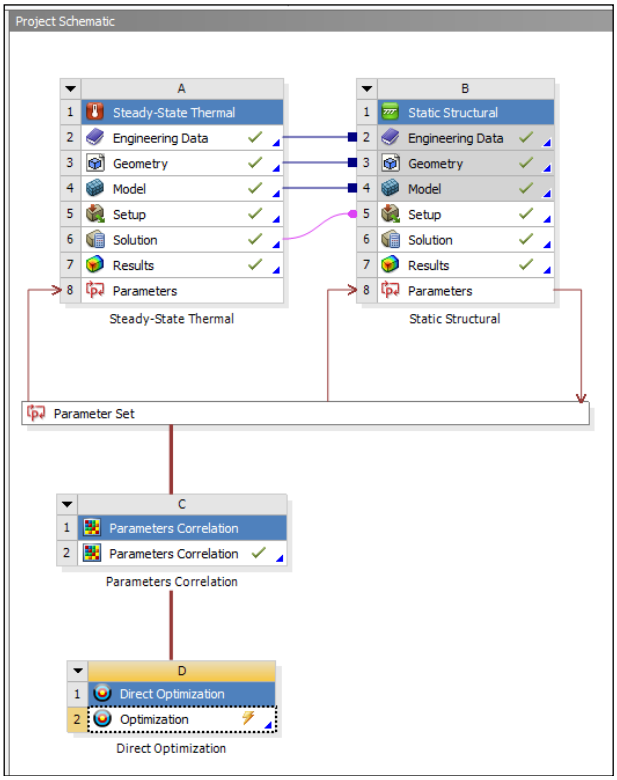
Basitleştirilen bu modelde Şekil 3 (b)'de görüldüğü gibi kesme silindiri borusu, silindir kapağı, piston ve silindir boğazı parçaları bulunmaktadır. Silindir borusu boyu; L = 1700 mm, iç çapı; r_i = 540 mm ve dış çapı; r_o = 730 mm ölçülerindedir. Aymas firması fabrikasında yapılan bu parçaların üretiminde, kesme silindiri borusu ve kapağı için; yapı çeliği (S355JR), piston ve silindir boğazı için; AISI 1040 çelik malzemesi kullanılmaktadır. Bu çelik malzemelerin mekanik ve ısıl özellikleri Tablo 2'de verilmektedir [16, 17].

Tablo 2. Çelik malzemelerin mekanik ve ısıl özellikleri.

Malzeme	Akma Muk.	Elastisite Mod.	Poisson Oranı	Isıl Gen. Kats.
S355JR	355 MPa	210 GPa	0.30	1.20×10^{-5}
AISI 1040	589 MPa	212 GPa	0.29	1.12×10^{-5}

Burada geliştirilen modelde hidrolik yağ sıcaklık değişiminin analizini yapmak için Şekil 4'de görüldüğü gibi ANSYS workbench'te kararlı-hal ısıl (steady-state thermal) modülü ve eşdeğer gerilme ile şekil değiştirmenin bulunması için statik yapısal (static structural) modülü çalışma ortamına eklenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinin yapılmasından sonra her girdi parametresinin çıktı parametreleri üzerinde olan etkisini bulmak amacı ile parametrik korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için ANSYS workbench'te

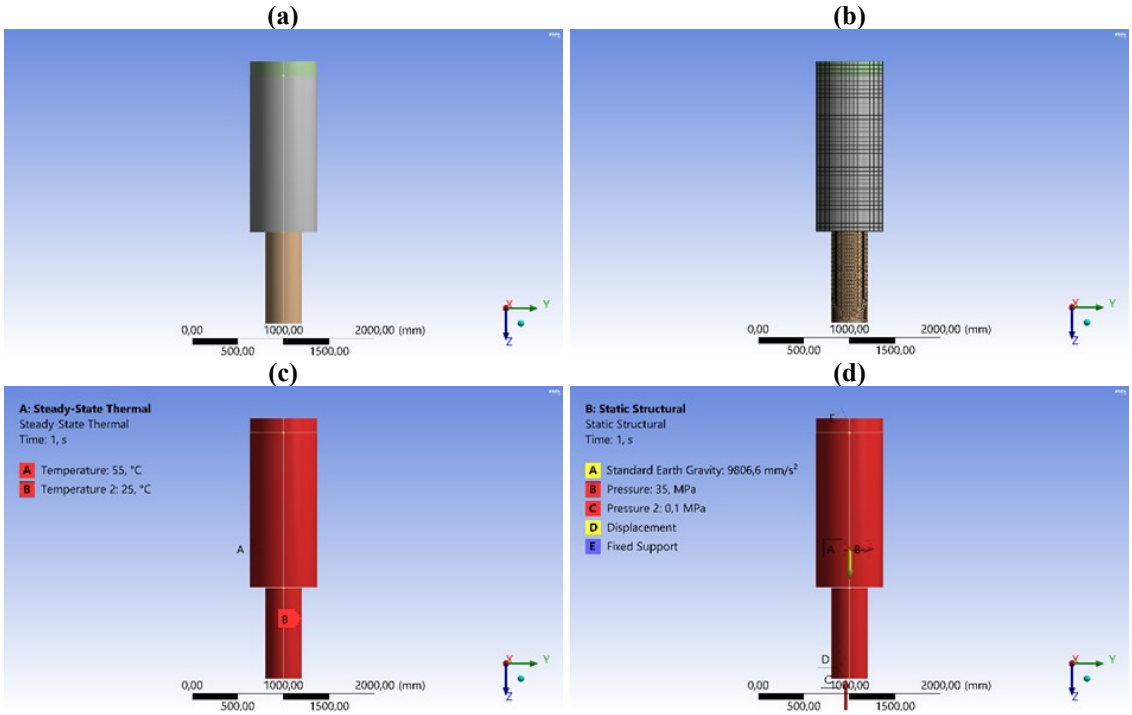
parametrik korelasyon (parameters correlation) modülü ve optimizasyon işlemi için doğrudan optimizasyon (direct optimization) modülü eklenmiştir.



Şekil 4. ANSYS workbench'te kesme silindiri modeli çözüm modülleri.

Şekil 5 (a)'da sonlu elemanlar analizi için SolidWorks'de hazırlanan kesme silindirlerinin basitleştirilmiş üç boyutlu katı modelinin ANSYS yazılımına aktarılan geometrisi verilmektedir. ANSYS'de kesme silindiri borusu ile silindir kapağı malzemesi; yapı çeliği ve piston ile silindir boğazı malzemesi; çelik AISI 1040 seçilerek girilmiştir. Bundan sonra gelen adımda modelin ağ yapısı ölçüsü 15 mm girilerek Şekil 5 (b)'de görülen ağ yapısı (mesh) bulunmuştur. Yapılan çalışmada kesme silindirinin katı modelinin ANSYS sonlu elemanlar analizi ağ yapısı (mesh); 1 623 201 adet düğümden (nodes) ve 820 715 adet elemandan (elements) oluşmaktadır.

Şekil 5 (d)'de görülen kesme silindiri yapısal analizinde gerekli olan diğer sınır şartlarının da modele girişi yapılarak sistemin analizi hazırlanmıştır. Kesme silindiri modelinde; "E" ile gösterilen üst kapak bölümü sabit destek (fixed support) sınır şartı girilmiştir. Kesme silindirinde çalışan hidrolik yağ basınç değeri; Şekil 5 (d)'de "B" ile gösterilen basınç (pressure) sınır şartı olarak bütün silindir borusu ve kapağının iç yüzeyi ile silindir pistonu üst yüzeyine 35 MPa olarak uygulanmıştır. Dış basınç; "C" ile gösterildiği üzere kesme silindirinin bütün dış yüzeylerine uygulaması yapılmıştır. Standart yerçekimi "A" ile gösterildiği gibi, +Z ekseni yönünde uygulanmıştır. En son olarak tepki kuvvetini hesaplamak için piston mili alt yüzeyine "D" ile gösterilen yer değiştirme (displacement) sınır şartı girilmiştir.

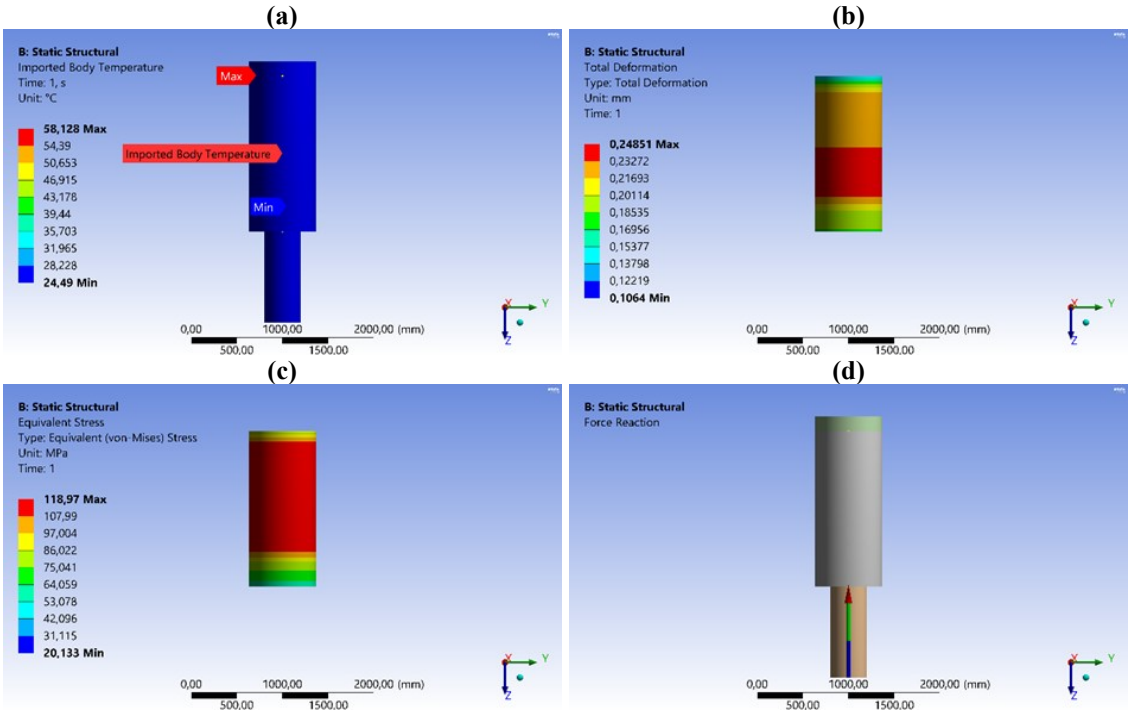


Şekil 5. ANSYS'de statik yapısal analiz modülü (a) geometri, (b) ağ yapısı, (c) ısıl modül sınır şartları ve (d) yapısal modül sınır şartları.

İlk olarak kesme silindiri sıcaklık dağılımının çözümü; yapısal analizde kullanılmak üzere kararlı hal ısıl modülünde Şekil 5 (c)'de verildiği gibi hidrolik yağın sıcaklık değeri; 55 ^{o}C ve dış ortamın sıcaklık değeri; 25 ^{o}C girilerek yapılmıştır. Kararlı hal ısıl modülünde kesme silindiri parçalarının sıcaklık dağılımı bulunduktan sonra statik yapısal analiz modülünde yer alan yük aktarma (import load) komutu kullanılarak Şekil 6 (a)'da görüldüğü üzere statik yapısal analize aktarılmıştır.

Kesme silindiri borusu yüzeyi ile temasta olan piston yüzeyi arasında ve piston mili yüzeyi ile temasta olan piston boğazı yüzeyi arasındaki bölgeler sürtünmeli (frictional) olarak ve sürtünme katsayısı (friction coefficient) 0.2 olarak modele girişi yapılmıştır. Yapılan bütün bu ayarlamalar bittikten sonra çözüm aşamasına geçilmiştir. Oluşturulan modelin yapısal analiz çözümü yapıldıktan sonra kalın duvarlı kesme silindiri borusunda meydana gelen toplam şekil değiştirmesi ve eşdeğer gerilmesi ile kesme kuvveti sonuçları sırası ile alınmış ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6 (b)'de verilen sonuçların incelemesi yapıldığında kalın duvarlı silindir borusunda oluşan en yüksek toplam şekil değiştirme değeri 0.2485 mm olarak silindir borusunun orta bölgesinde görülmektedir. Ayrıca kalın duvarlı silindir borusunun en yüksek eşdeğer gerilme değeri Şekil 6 (c)'ye göre 118.97 MPa olarak silindir borusunun orta bölgesinde meydana gelmektedir. Kalın duvarlı silindir pistonunun alt yüzeyinde en yüksek kesme kuvveti değeri Şekil 6 (d)'de gösterilen tepki kuvveti (force reaction) değeri okunarak; 8.02 x 10^{6} N olarak bulunmuştur.



Şekil 6. ANSYS'de statik yapısal analiz modülünde (a) silindirin sıcaklık çözümü, (b) toplam şekil değiştirme, (c) eşdeğer gerilme ve (d) tepki kuvveti çözümleri.

2.1. Analitik çözüm

Yüksek sıcaklık ve basınç etkisi altında çalışmakta olan silindirik elemanların elastik ve elastik-plastik sınır davranışlarının bulunması için çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır [13, 18-21]. Kandil ve ark. [22] yaptıkları çalışmada değişen iç yüzey sıcaklık ve basınç sınır şartlarındaki kalın duvarlı silindirlerin elastik davranışını analitik olarak ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Bu çalışma ile silindir yarıçapına göre değişen teğetsel, radyal ve eksenel gerilmeler için sırası ile Denklem (1) – (3) ile verilen denklemleri bulmuşlardır [22];

$$\sigma_t = \left[\frac{P_i}{(K^2-1)}\left(1+\frac{r_o^2}{r^2}\right)\right] + \left[\frac{H}{2lnK}\left(1 - ln\frac{r_o}{r} - \frac{1}{K^2-1}\left(1+\frac{r_o^2}{r^2}\right)lnK\right)\right] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \left[\frac{P_i}{(K^2-1)}\left(1-\frac{r_o^2}{r^2}\right)\right] + \left[\frac{H}{2lnK}\left(-ln\frac{r_o}{r} - \frac{1}{K^2-1}\left(1-\frac{r_o^2}{r^2}\right)lnK\right)\right] \quad (2)$$

$$\sigma_e = \left[\frac{P_i}{(K^2-1)}\right] + \left[\frac{H}{2lnK}\left(1 - 2ln\frac{r_o}{r} - \frac{2}{K^2-1}lnK\right)\right] \quad (3)$$

Bu denklemlerde, $K=r_o/r_i$; dış-iç yarıçap oranı olmaktadır ve H; ısıl yük ise Denklem (4) ile verilmiştir [22];

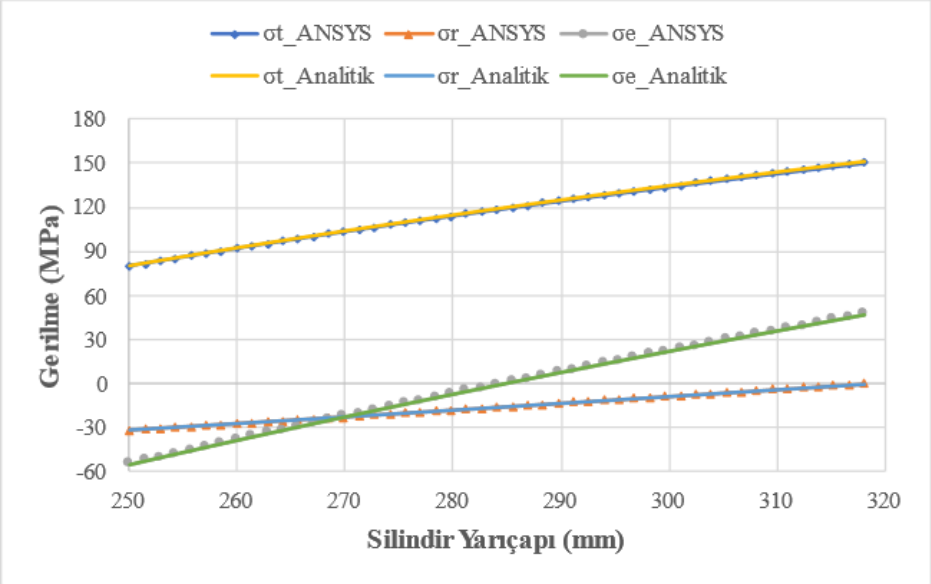
$$H = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\nu} \quad (4)$$

Denklem (1) – (4)'te, E ile elastisite modülü, α ile ısıl genleşme katsayısı, $\Delta T=T_i - T_o$ ile iç – dış yüzeyler arası sıcaklık farkı ve ν ile Poisson oranı ifade edilmektedir. Bunun

yanında bu çalışma ile kalın duvarlı silindirlerin elastik davranışını belirlemek amacı ile von Mises eşdeğer gerilme ölçütünden yararlanılmıştır [22];

$$\sigma_{vM} = [\sigma_t^2 + \sigma_r^2 + \sigma_e^2 - \sigma_t\sigma_r - \sigma_t\sigma_e - \sigma_r\sigma_e]^{0.5} \quad (5)$$

Analitik olarak bulunan Denklem (1) – (5) kullanılarak Öğüçlü [23] tarafından yapılan çalışmada C programlama dilinde bir program geliştirilmiş ve bu programın kullanılması ile değişen silindir yarıçapı ölçülerine göre bu gerilme değerlerinin hesaplanması yapılmıştır. Daha sonra söz konusu çalışmada ANSYS ile geliştirilen sonlu elemanlar modeli ile radyal, eksenel ve teğetsel gerilmeler bulunmuş ve Denklem (1) – (3) ile verilen analitik denklemler kullanılarak bulunan gerilme değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 7'de verilen bu karşılaştırmadan ANSYS modeli ve analitik denklemler kullanılarak bulunan her iki çözümün birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür [23].

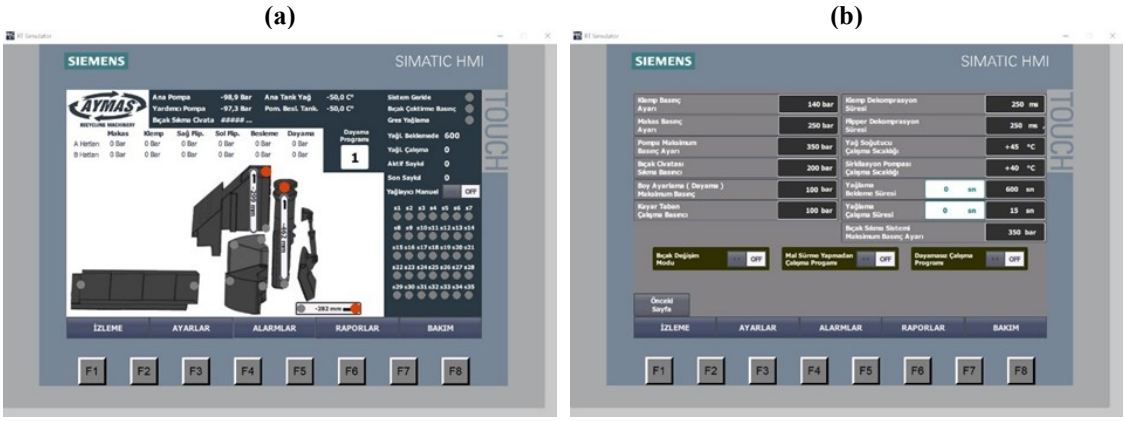


Şekil 7. ANSYS çözümü ile analitik çözümün karşılaştırılması [23].

2.2. Test çalışmaları

AYMAS firması fabrikasında imalatı yapılan eğik makasların içine metal hurda yüklemeden kesme silindirlerinin altına takoz koyarak çalıştırılması ile test ve kontrol çalışmaları yapılmaktadır. Eğik makaslar sahada uzaktan kumanda ile yapılan otomatik veya kontrol panelinden yapılan el ile veya otomatik çalıştırma yöntemleri ile kullanılabilmektedir. Şekil 8'de kontrol panelindeki eğik makas (a) bilgi izleme ekranı ve (b) ayarlar izleme ekranı görülmektedir [15]. Bilgi ekranından; eğik makasın işlemsel olarak bulunduğu konum ve arıza durumu ile ilgili bilgiler izlenebilir. Bu ekranda silindir konumları, basınç değerleri, yağ sıcaklığı bilgileri bulunmaktadır. Bu ekranda, "AYARLAR" düğmesine basılarak, Şekil 8 (b) ile gösterilen ayarlar ile ilgili bilgiler hakkındaki ekrana geçilebilir. Bu ekrandan silindir basınçları ve hidrolik yağ sıcaklık ayar bilgileri izlenebilir ve eğik makas ile ilgili çeşitli ayarlar bu sayfada yapılabilir [15].

(a) **(b)**



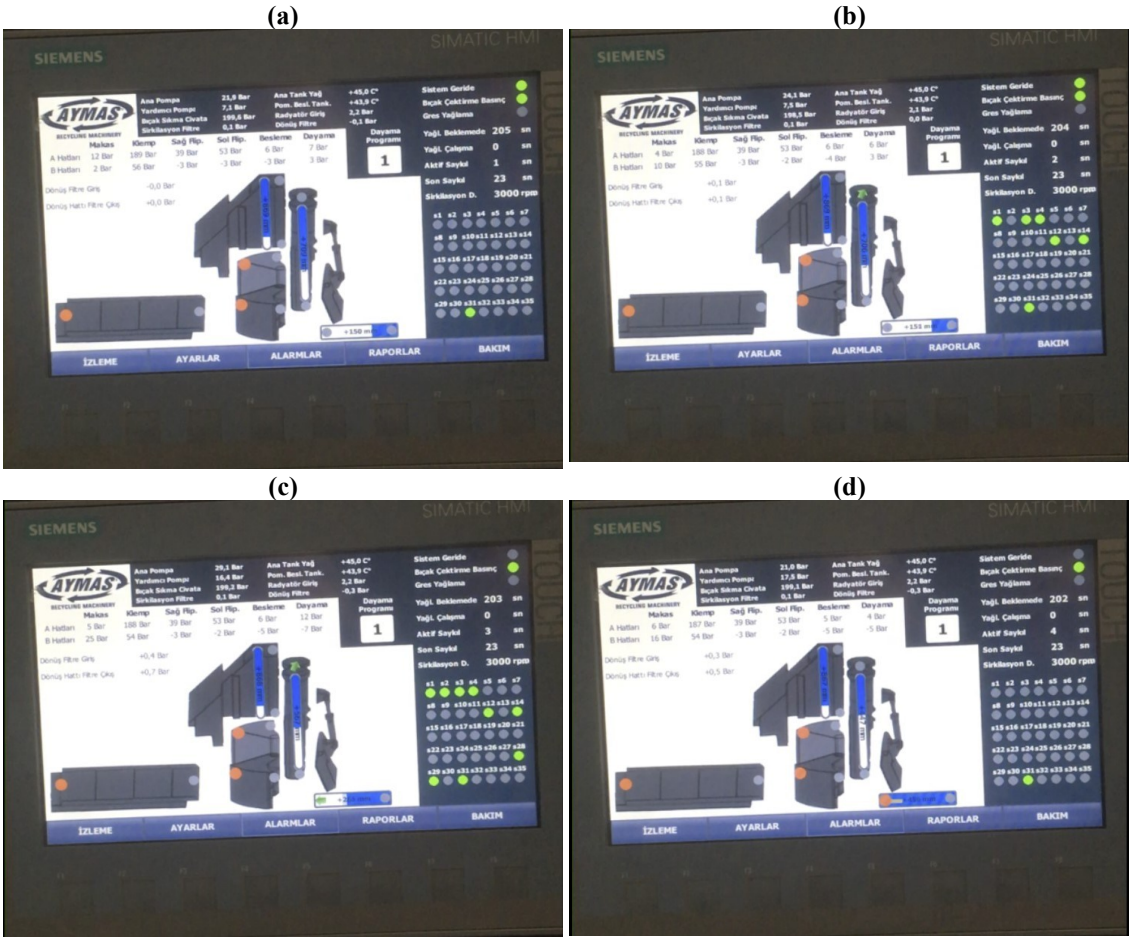
Şekil 8. Eğik makas (a) bilgi izleme ekranı ve (b) ayarlar izleme ekranı.

Yapılan test çalışmaları esnasında eğik makasın izleme ekranı üzerinden çalışma şartları 0,1 s aralıklar ile belirlenmiştir. Tablo 3'te bu değerler $\Delta t = 28 - 37$ s aralığında özet olarak gösterilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi kesme silindiri pistonu, giyotin altına konulan takoz nedeni ile $\Delta t = 30 - 32$ s zaman aralığında ilerleme yapamamış, ilerleme yaklaşık 715 mm'de sabit kalmış fakat silindir basıncı artmıştır. Daha sonra t = 32 s'den itibaren silindir pistonu yukarı çekme çevrimi başlamıştır.

Tablo 3. Takoz testi aşamasında eğik makas test sonuçları.

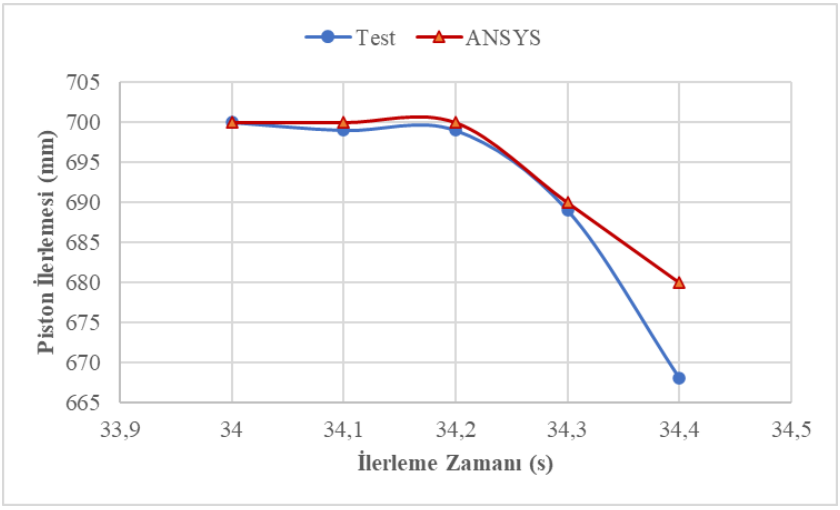
Ölçülen Zaman (s)	İzleme Ekranı İlerleme (mm)	İzleme Ekranı Basınç (bar)
28	452	0
29	569	3
30	698	4
31	714	182
32	716	207
33	702	2
34	700	10
35	567	25
36	447	16
37	432	5

Şekil 9'da $\Delta t = 33 - 36$ s zaman aralığında takoz testi aşamasında eğik makas izleme ekranından alınan görseller verilmiştir.



Şekil 9. Takoz testi aşamasında eğik makasın izleme ekranı; (a) t=33 s, (b) t=34 s, (c) t=35 s ve (d) t=36 s.

ANSYS'de yapılan kesme silindiri modeli ile test çalışmalarını karşılaştırmak için, Δt = 34 – 34,4 sn zaman aralığında silindir basınç değişimleri modele girilmiştir. Bu test çalışması esnasında hidrolik yağ sıcaklığı ortalama olarak 45 ºC olarak izleme ekranından tespit edilmiştir. ANSYS'de bu şartlara uygun olarak modelin çözümü yapılmıştır.



Şekil 10. ANSYS modelinde ve takoz testinde piston ilerlemesi değişimleri.

Şekil 10'da Δt = 34 – 34,4 sn zaman aralığında test çalışması ve ANSYS modeli ile bulunan piston ilerlemesi değişimleri görülmektedir. Şekil 10'da verilen bu karşılaştırmadan ANSYS modeli ve takoz testi ile bulunan değerlerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Böylece hem analitik çözüm ile hem de test çalışmaları ile uyumlu sonuçlar veren ANSYS modelinin bu çalışmada kullanılmasının uygun olduğuna karar verilmiştir.

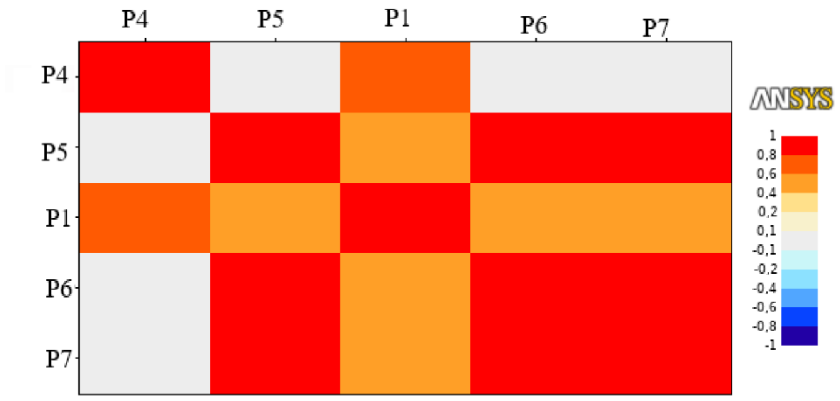
Bundan sonraki aşamada, EM1600 eğik makas kesme grubunda bulunan kesme silindirinin içinde çalışan hidrolik yağın sıcaklık ve basınç değişkenleri girdi parametresi olarak belirlenmiştir. Söz konusu bu parametrelerin alt ve üst sınır değerlerinin seçimi yapılırken, eğik makasın işletmedeki çalışmasında görülen gerçek değerlerinin alınmasına özen gösterilmiştir. Hidrolik yağ basınç parametresinin değişim aralığı; 25 – 35 MPa, sıcaklık için ise 35 – 55 ^{o}C olarak belirlenmiştir. ANSYS modeli ile bulunan toplam şekil değiştirme, eşdeğer gerilme ve kesme kuvveti çıktı parametreleri olarak seçilmiştir. Bütün bu parametrelerin açıklamaları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. ANSYS girdi ve çıktı parametreleri.

Girdi Parametreleri			
	Açıklama	Alt Sınır Değeri	Üst Sınır Değeri
P4	Sıcaklık (^{o}C)	35	55
P5	Basınç (MPa)	25	35
Çıktı Parametreleri			
	Açıklama	Hesaplanan En Küçük Değer	Hesaplanan En Büyük Değer
P1	Toplam Şekil Değiştirme (mm)	0.1556	0.2452
P6	Kesme Kuvveti (N)	5.76 x 10^{6}	8.02 x 10^{6}
P7	Eşdeğer Gerilme (MPa)	69.02	118.97

Parametrik korelasyon çalışmalarında yaygın bir şekilde Pearson ve Spearman korelasyonları olmak üzere iki farklı korelasyon çeşidi kullanılmaktadır. Bunlardan ilki doğrusal bir korelasyon türü olan Pearson korelasyonudur. Bu yöntemde ölçümü yapılan iki sayısal değer arasında bir ilişki bulunup bulunmadığı araştırılır [4]. Bu yöntemin uygulanması ile "-1" ile "1" aralığında değişim gösteren sayısal bir sonuç bulunur. Bu sonuç; girdi değişkeni ile çıktı değişkeni arasında bulunan ilişkiyi gösterir. Başka bir deyişle, girdi değişkeninin çıktı değişkeni üzerinde olan etkisini tanımlar. Geniş olarak kullanımı olan diğer bir korelasyon çeşidi ise Spearman korelasyonu olarak adlandırılır. Bu yöntem, Pearson korelasyon yöntemine göre daha kapsamlı olmaktadır. Genel olarak değişkenleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olan çalışmalar için tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem kullanıldığında; Pearson yöntemine benzer olarak, "-1" ile "1" değerleri arasında değişen sonuçlar bulunur. Bu sonuçlar "1" değerine yaklaştıkça parametreler arasında olan ilişki değerinin artışı aynı yönde olur, bulunan sonucun "-1" değerine yaklaşması parametreler arasında olan ilişkinin değerinin ters yönde arttığını gösterir [24].

Bu çalışmada yapılan analizler ile bulunan sonuçların değerlendirilmesi için Pearson korelasyon yöntemine göre daha kapsamlı bir yöntem olan Spearman korelasyonu kullanılmıştır. Yapılan parametrik analiz çalışmasında girdi parametreleri olan sıcaklık ve basınç değerleri Tablo 4'te belirtilen aralıkta değiştirilerek 100 farklı model oluşturulmuştur. ANSYS uygulamasında bu modellerin tanımı yapıldıktan sonra Parametrik Korelasyon modülü kullanılarak 100 farklı model için analizlerin çözümü yapılmış ve korelasyon sonuçları bulunmuştur. Tablo 4'te çıktı parametrelerinin hesaplamalar sonucu elde edilen en küçük ve en büyük değerleri verilmiştir. Bu sonuçlar ile oluşturulan ve Şekil 11'de renkler ile gösterilen matriste, sıcaklık ve basınç girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerinde olan etkilerinin şiddeti verilmiştir.



Şekil 11. Renklerle gösterilmiş korelasyon matrisi.

Ayrıca ANSYS'de Şekil 12'de tablo halinde verilen matris, Şekil 11 ile renkli olarak verilen korelasyon matrisindeki aynı sonuçların sayısal olarak gösterilmiş halidir.

Table of Schematic C2: Parameters Correlation

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P4 - Sicaklik	P5 - Basinc	P1 - Toplam Sekil Degistirme	P6 - Kesme Kuvveti	P7 - Esdeger Gerilme
2	P4 - Sicaklik	1	-0,096382	0,79225	-0,096382	0,094533
3	P5 - Basinc	-0,096382	1	0,40259	1	0,97837
4	P1 - Toplam Sekil Degistirme	0,79225	0,40259	1	0,40259	0,56338
5	P6 - Kesme Kuvveti	-0,096382	1	0,40259	1	0,97837
6	P7 - Esdeger Gerilme	0,094533	0,97837	0,56338	0,97837	1

Şekil 12. Tablo halinde korelasyon matrisi.

Şekil 11'de girdi parametrelerinden birinin çıktı parametrelerinden herhangi biri üzerindeki etkisinin şiddeti ve yönü görülmek istendiğinde, bu girdi ve çıktı parametrelerinin yer aldığı satır ve sütun kesişimlerinde oluşan parçanın gösterdiği renk değerine bakılarak etkinin şiddeti ve yönü anlaşılmaktadır. Eğer kesişim renkleri kırmızıya yaklaşıyor ise korelasyon değeri "1" değerine yaklaşıyor demektir. Bu kesişim parçasının bulunduğu satır ve sütundaki parametreler arasında doğru orantılı olarak ilişki değeri artmaktadır. Eğer matriste bulunan renk değerleri mavi renk değerine yaklaşıyor ise iki değişken arasında bulunan bağıntı değeri "-1" değerine yaklaşıyor demektir. Bu sonuç matriste bulunan renk mavi rengine yaklaştıkça kesişim parçasının bulunduğu satır ve sütunda bulunan değişkenler arasında ters yönde korelasyon değerinin artmakta olduğunu ifade eder. Bu tabloda sıfıra yakın olan korelasyon değerleri, satır ve sütunda

bulunan parametreler arasındaki bağıntının az olduğunu ve bu parametrelerde gerçekleşen değişimlerin birbirlerini etkilemediğini ifade eder [24].

Şekil 12 incelendiğinde sıcaklık girdi parametresi ile toplam şekil değiştirme çıktı parametresi arasındaki korelasyon değeri 0.79 olarak görülmektedir. Buradan sıcaklık girdi değerinin toplam şekil değiştirme üzerinde doğru orantılı olarak artacak şekilde etkili olduğu sonucu çıkmaktadır. Bununla birlikte sıcaklık girdi parametresinin diğer iki çıktı parametresi arasındaki korelasyon değeri yaklaşık 0.09 olarak görülmektedir. Buradan sıcaklık girdi değerinin eşdeğer gerilme ve kesme kuvveti çıktı parametreleri üzerinde etkisinin çok az olduğu sonucu çıkmaktadır.

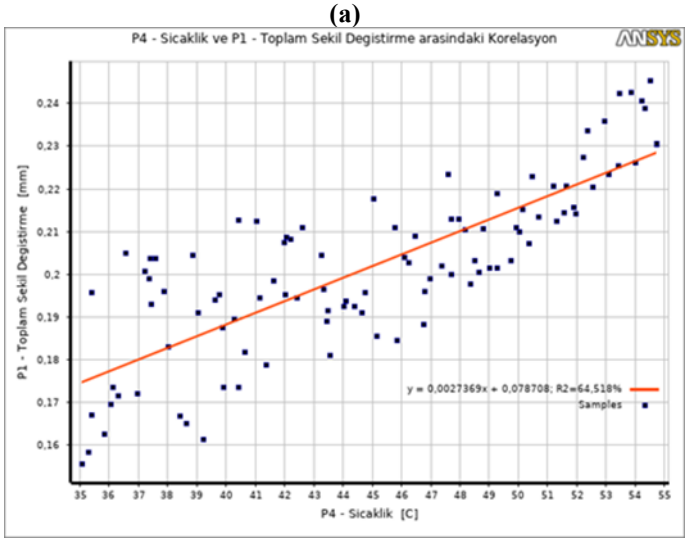
Basınç girdi parametresi ile toplam şekil değiştirme çıktı parametresi arasındaki korelasyon değeri 0.4 olarak görülmektedir. Buradan basınç girdi değerinin toplam şekil değiştirme üzerinde doğru orantılı olarak artacak şekilde fakat sıcaklık girdi parametresine göre daha az etkili olduğu sonucu çıkmaktadır. Bununla birlikte basınç girdi parametresinin eşdeğer gerilme çıktı parametresi arasındaki korelasyon değeri 1 olarak görülmektedir. Buradan basınç girdi değerinin eşdeğer gerilme çıktı parametresi üzerinde etkisinin çok yüksek olduğu sonucu çıkmaktadır. Aynı şekilde basınç girdi parametresinin kesme kuvveti çıktı parametresi arasındaki korelasyon değeri 0.98 olarak görülmektedir. Buradan basınç girdi değerinin kesme kuvveti çıktı parametresi üzerinde etkisinin yine çok olduğu sonucu çıkmaktadır.

3. Sonuçlar ve tartışma

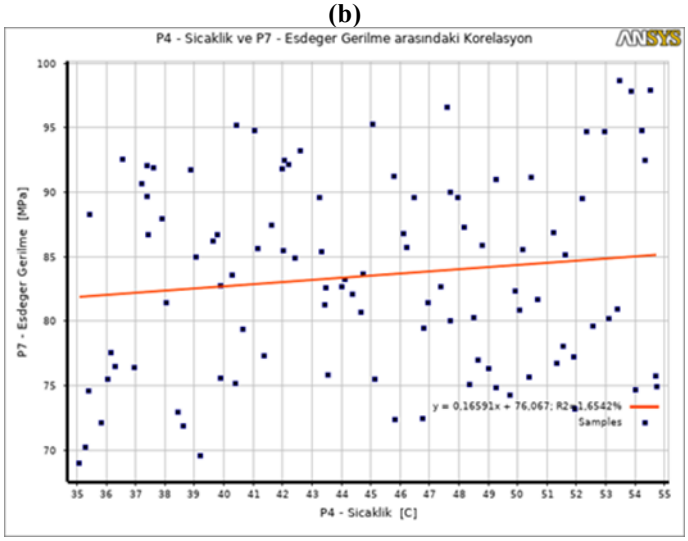
Şekil 11 ve 12 incelendiğinde girdi parametrelerinden sıcaklık değerinin toplam şekil değiştirme üzerinde doğru orantılı olarak artacak şekilde etkili olduğu, eşdeğer gerilme ve kesme kuvveti üzerinde etkisinin çok az olduğu görülmektedir. Şekil 13'de birlikte verilen ve ANSYS'den alınan sıcaklık girdi parametresinin bu çıktı parametreleri üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 11 ve 12 incelendiğinde girdi parametrelerinden basınç değerinin toplam şekil değiştirme üzerinde sıcaklık girdi parametresine göre daha az miktarda, doğru orantılı olarak artacak şekilde etkili olduğu, eşdeğer gerilme ve kesme kuvveti üzerinde ise etkisinin doğru orantılı olarak artacak şekilde çok fazla olduğu görülmektedir. Şekil 14'de basınç girdi parametresinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir.

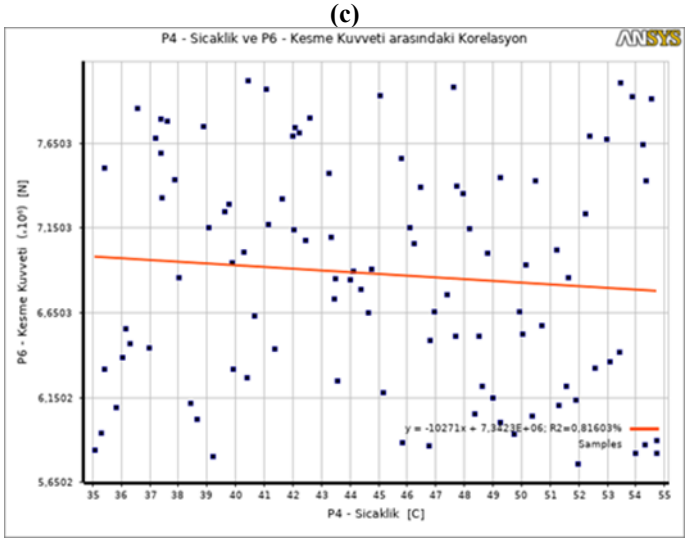
(a)



(b)

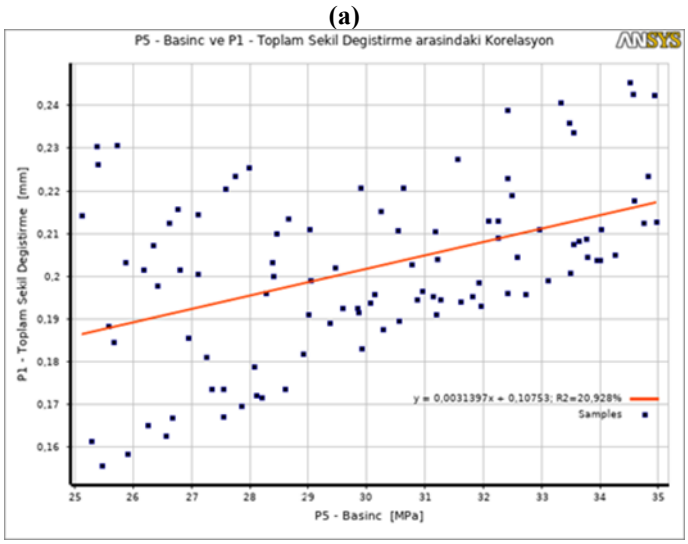


(c)

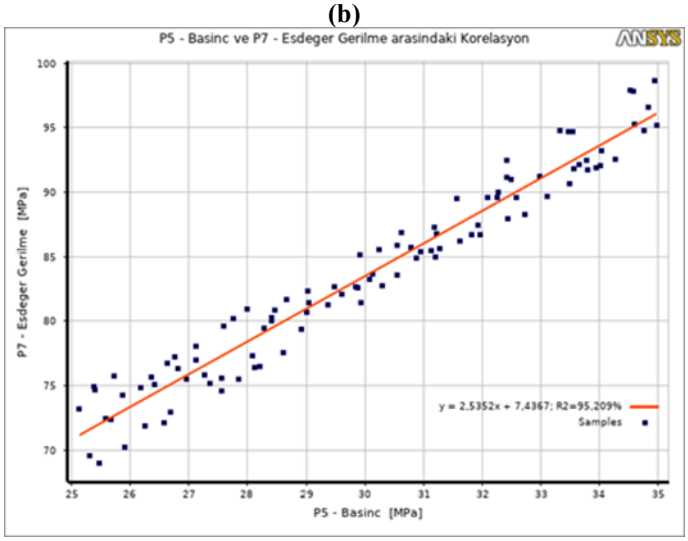


Şekil 13. Sıcaklık girdi parametresinin (a) toplam şekil değiştirme, (b) eşdeğer gerilme ve (c) kesme kuvveti çıktı parametreleri üzerinde etkisi.

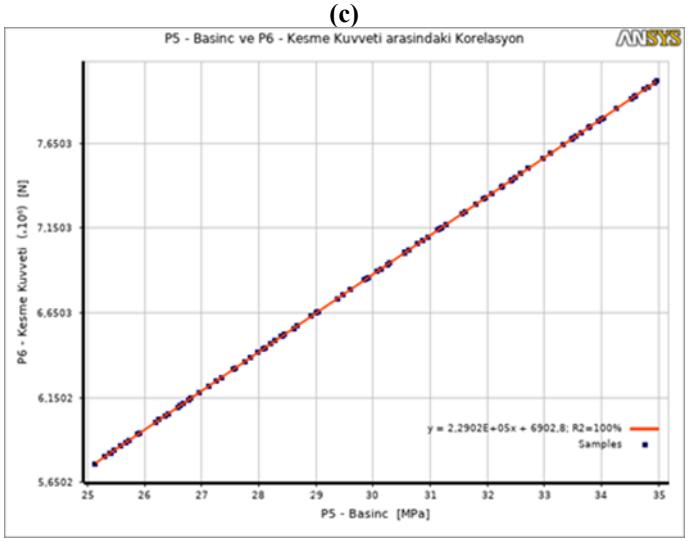
(a)



(b)



(c)



Şekil 14. Basınç girdi parametresinin (a) toplam şekil değiştirme, (b) eşdeğer gerilme ve (c) kesme kuvveti çıktı parametreleri üzerinde etkisi.

Buraya kadar eğik makasın kesme silindiri için seçilen girdi parametrelerinin, çalışma sonucu bulunan tüm çıktı parametreleri üzerine etkisi Parametrik Korelasyon yöntemi ile

ayrı ayrı incelenmiştir. Bundan sonraki aşamada bu çalışmadaki optimizasyon problemi; optimizasyon değişkenleri ve sınır değerleri belirlenerek ANSYS'de doğrudan optimizasyon modülü kullanılarak çözülmüştür. Kalın duvarlı silindirler için literatürde güvenlik katsayısı; s = 3.5 – 6 arasında verilmektedir. Burada yapılan çalışmada, s = 3.5 olarak alınmıştır [25]. Eğik makas silindir malzemesi olan yapı çeliği (S355JR) için akma dayanımı olan 355 MPa için en büyük gerilme değeri yaklaşık 101 MPa olmaktadır. Ayrıca toplam şekil değiştirme için üst sınır değeri için eğik makas kesme grubunda, kesme silindiri borusu ile taşıyıcı saç parça arasındaki boşluk (pay) değeri olan 1 mm ölçüsü alınmıştır. Bu çalışmadaki optimizasyon problemi şu şekilde ifade edilebilir;

$$35\ ^oC \leq Sıcaklık \leq 55\ ^oC$$

$$25\ MPa \leq Basınç \leq 35\ MPa$$

$$EnKüçük\{Eşdeğer\ Gerilme\} \leq 101\ MPa \qquad (6)$$

$$EnKüçük\{Toplam\ Şekil\ Değiştirme\} \leq 1\ mm$$

$$EnBüyük\{Kesme\ Kuvveti\} \geq F_{hedef}$$

ANSYS yazılımına bu optimizasyon problemi değerleri girilmiştir. Böylece ANSYS doğrudan optimizasyon modülü kullanılarak, F_{hedef} = 7.9 x 10^6 N ile 5.5 x 10^6 N arasındaki en büyük kesme kuvveti değerleri için bu şartları sağlayan kesme silindirlerinde yer alan hidrolik yağa ait sıcaklık ve basınç değişkenlerinin en uygun değerleri bulunmuştur. Kesme kuvveti değeri; F_{hedef} = 7.3 x 10^6 N için ANSYS'de optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım aday noktaları (candidate points) Şekil 15'te görülmektedir. Bu kuvvet değeri için en uygun sıcaklık değeri ANSYS tarafından T = 48.529 ºC ve en uygun basınç değeri P = 33.419 MPa olarak verilmektedir.

Table of Schematic D2: Optimization , Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Reference	Name	P4 - Sicaklik (C)	P5 - Basinc (MPa)	P1 - Toplam Sekil Degistirme (mm)		P6 - Kesme Kuvveti (N)		P7 - Esdeger Gerilme (MPa)	
2					Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Candidate Point 1	38,988	32,794	0,19929	-%9,31	7,5175E+06	-%1,87	89,164	-%4,34
4	○	Candidate Point 2	42,647	32,336	0,2022	-%7,99	7,4127E+06	-%3,24	88,804	-%4,72
5	◉	Candidate Point 3	48,529	33,419	0,21975	%0,00	7,6606E+06	%0,00	93,207	%0,00
*		New Custom Candidate Point	45	30						

Şekil 15. F_{hedef} = 7.3 x 10^6 N için ANSYS'de optimizasyon tasarım aday noktaları.

F_{hedef} = 7.9 x 10^6 N ile 5.5 x 10^6 N arasındaki en büyük kesme kuvveti değerleri için ANSYS'de bu optimizasyon işlemi dört defa daha tekrarlanmıştır. Bu yolla tüm hedef kesme kuvveti değerleri için bulunan sıcaklık ve basınç girdi parametrelerinin en uygun değerleri aday noktaları arasından seçilerek Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Eğik makas kesme silindiri için en uygun çalışma şartları.

Kesme Kuvveti (N)	Sıcaklık (ºC)	Basınç (MPa)
7.9 x 10^6	42.943	34.725
7.3 x 10^6	48.529	33.419
6.7 x 10^6	42.647	31.678
6.1 x 10^6	42.647	28.842
5.5 x 10^6	35.588	25.229

Bu çalışma ile EM1600 eğik makasın kesme silindirlerinin çalışma koşullarının parametrik olarak tasarımı yapılmış ve ANSYS'de optimizasyon işlemi ile iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Solidworks yazılımında eğik makasın kesme silindirlerinin üç boyutlu katı modelinin tasarımı yapılmış daha sonra çeşitli basitleştirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Basitleştirilmiş bu katı model sonlu elemanlar analizlerinin yapılması için ANSYS yazılımına aktarılmıştır. EM1600 eğik makasın işletmelerdeki çalışma koşullarında ölçülen sıcaklık ve basınç değerleri aralığına uygun olarak ANSYS çalışma ortamında kalın duvarlı kesme silindirleri için bir model geliştirilerek sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Bu çalışma ile bulunan kalın duvarlı silindir borusunda oluşan en yüksek toplam şekil değiştirme değeri; 0.2485 mm olarak silindir borusunun orta bölgesinde görülmektedir. Ayrıca kalın duvarlı kesme silindiri borusunun en yüksek eşdeğer gerilme değeri; 118.97 MPa olarak silindir borusunun orta bölgesinde meydana gelmektedir. Kalın duvarlı kesme silindiri pistonunun en yüksek kesme kuvveti değeri; 8.02 x10^6 N olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada EM1600 eğik makasın kesme silindirlerinde bulunan hidrolik yağın sıcaklık ve basınç değerleri ANSYS'de girdi parametresi olarak, silindir duvarında oluşan radyal, eksenel ve teğetsel gerilmelerin kullanılması ile bulunan von Mises eşdeğer gerilmesi ile toplam şekil değiştirmesi çıktı parametresi olarak kullanılmıştır. Bunun yanında eğik makasın kesme silindirleri tarafından sağlanan kesme kuvveti değeri de ANSYS'de çıktı parametresi olarak kullanılmıştır. Daha sonra bu parametrelerin kullanılması ve Parametrik Korelasyon Yöntemi yardımı ile ANSYS yazılımında çok amaçlı optimizasyon işlemi yapılmıştır. Bunun için toplam şekil değiştirme parametresi ile von Mises eşdeğer gerilme parametresi kısıt olarak belirlenmiş ve bu değişkenlerin en küçük değerlerinin bulunması istenmiş, kesme kuvveti parametresi ise hedef olarak belirlenmiş ve en büyük değerinin bulunması talep edilmiştir. Çalışma ile bu şartları yerine getiren ve girdi parametresi olarak belirlenen kesme silindirlerinde bulunan hidrolik yağın sıcaklık ve basınç parametrelerinin en uygun değerleri elde edilmiştir. En yüksek kesme kuvvetine göre ANSYS'de yapılan optimizasyon işlemi ile bulunan ve Tablo 5'te verilen en uygun sıcaklık ve basınç parametreleri kullanılarak, eğik makasın çok fazla yüke ihtiyacı olmadığı durumlarda kesme silindirlerinin kademeli olarak kullanımı gerçekleştirilebilir. Bu şekilde kesme silindirlerinin gereksiz yere çok fazla zorlanması önlenebilir. Böylece kesme silindirleri daha az yüklerde kullanılarak eğik makasın hidrolik sisteminin de düşük güçlerde çalışması sağlanarak enerji tasarrufuna katkıda bulunabilir.

Kaynaklar

[1] Türemen, M., Demir, A. ve Özdoğan, E., Tekstil endüstrisi için geri dönüşüm ve önemi, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 25, 7, 805-809, (2019).

[2] Ayyıldız, M., Çiçek, A. ve Kara, F., Bilgisayar destekli tasarımda parametrik dişli çark uygulamaları, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 2, 3, 643-651, (2010).

[3] Sırmalılar, M. Y., Haktanır, M., Saklakoğlu, N. ve Eş, C., Ağır ticari araçlarda kullanılan bir volanın parametrik optimizasyon yöntemiyle tasarımının iyileştirilmesi, **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 10, 4, 1341-1353, (2022).

[4] Sabuncuoğlu, B. ve Demirtaş, O., Helisel işleme yay sabitinin belirlenmesi amacıyla parametrik korelasyon tekniğini kullanarak bir yapay sinir ağı geliştirilmesi, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 36, 1, 105-118, (2021).

[5] Gündoğdu T., Kalıcı mıknatıslı vernier makinaların parametrik analizi, **Politeknik Dergisi**, 27, 3, 1169-1188, (2024).

[6] Asker, M. ve Günerhan, H., Faz değişim malzemeli ısı değiştirici üzerine parametrik bir çalışma, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 31, 3, 555-565, (2016).

[7] Aydın, Y. N., Korkut, T. B., Özaydın, O., Armakan, E., Sarı, G. ve Gören, A., Solaris 10 güneş arabası jantının deneysel ve teorik modal analizi ve elektrikli araç jantının parametrik tasarım ile hafifleştirilmesi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 23, 68, 689-699, (2021).

[8] Özden, O. B. ve Gökçe, B., Sonlu elemanlar yöntemi ve Taguchi metodu kullanılarak bir kara aracının parametrik olarak optimum tasarımının geliştirilmesi, **Dicle University Journal of Engineering**, 14, 2, 305-313, (2023).

[9] Celen, A. ve Kaba, M. Y., Elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryaların soğutulmasının parametrik incelenmesi, **Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 33, 1, 49-61, (2021).

[10] Kocaaslan, O., Yasa, T. ve Güleren, K. M., Türbülanslı yanma için döndürücünün parametrik çalışması, **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, 41, 2, 205-226, (2021).

[11] Çetin, B., Basit Brayton çevriminde elektrik üretimi maliyetinin parametrik analizi, **Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 29, 2, 1-8, (2017).

[12] Çelik, H. ve Parlak, N., Kanatçık geometrisinin ısı geçişine etkisinin parametrik incelenmesi, **International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies**, 2, 2, 25-29, (2018).

[13] Eraslan, A. N. ve Apatay, T., İç yüzey sıcaklığı periyodik olarak değişen kalın cidarlı tüplerde termoelastik gerilme davranışı: analitik çözüm, **20. Ulusal Mekanik Kongresi**, 728-735, Uludağ Üniversitesi, Bursa, (2017).

[14] https://www.aymasmakina.com/tr/urun/em-egik-makaslar, (20.01.2025).

[15] https://aymasmakina.com/upload/inclined_shear_190402102006_comp.pdf, (20.01.2025).

[16] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=8, (10.01.2025).

[17] http://www.steelnumber.com/en/equivalent_steel_iron_eu.php?zname_id=128, (10.01.2025).

[18] Apatay, T. ve Eraslan, A. N., Periyodik olarak sönümlenen iç ısı üretimi etkisindeki silindirin akma davranışı, **XIX. Ulusal Mekanik Kongresi**, 91-96, Trabzon, (2015).

[19] Eraslan, A. N., Apatay, T. ve Varlı, E., Dış yüzey sıcaklığı zamanla değişen silindirin elastik-plastik analitik çözümü, **XIX. Ulusal Mekanik Kongresi**, 437-444, Trabzon, (2015).

[20] Apatay, T., Eraslan, A. N. ve Çiftçi, B., Sinüzoidal değişen iç ısı üretimi etkisindeki silindirin kısmen plastik analitik çözümü, **XIX. Ulusal Mekanik Kongresi**, 97-104, Trabzon, (2015).

[21] Apatay, T. ve Eraslan, A. N. Analyses of elastic limit heat loads in thick walled tubes subjected to periodic surface temperatures: analytical treatment, **Archives of Mechanics Kongresi**, 37-53, Warszawa, (2018).

[22] Kandil, A., El-Baghdady, A. ve El-Shenawy, M., Analytical and finite element stress analysis of pressure vessels under constant and cyclic loading, **Port Said Engineering Research Journal**, 17, 2, 1-11, (2013).
[23] Öğüçlü, Ö., Geri dönüşüm makinelerinin parametrik optimizasyon yöntemleriyle yapısal tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir, (2024).
[24] Emerson, W. R., Causation and Pearson's correlation coefficient, **Journal of Visual Impairment & Blindness**, 36, 3, 242-244, (2015).
[25] ASME Boiler and pressure Vessel Standards, Section VIII, Division 2, (2023).

DOI:10.25092/baunfbed. 1556787 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 609-625, (2025)*

Üleksit, kolemanit, klinoptiloit zeolitli sıvaların radyoaktif ışınım soğurumu, basınç mukavameti, ısı yalıtımı ve antibakteriyel özelliklerinin karşılaştırılması

Ali Deniz KÜÇÜKÖZER[1], Tuana KAYA[1], İrem YALÇIN[1], N. Sibel ÖZATLI[1*]

[1] *Şehit Turgut Solak Fen Lisesi, Balıkesir*

Geliş Tarihi (Received Date): 26.09.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 19.04.2025

Öz

Bu çalışmada, üleksit, kolemanit ve klinoptiloit zeolitli sıvaların radyoaktif ışınım soğurumu, ısı yalıtkanlığı, su tutma kapasitesi, ses yalıtkanlığı, antibakteriyel özellik ve basınç dayanım açısından inşaat malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanit temin edilip, belirli oranlarda karıştırılarak gaz beton üzerine uygulanmıştır. Sıva örnekleri onar tekrar ile Geiger Müller dedektörü kullanılarak radyoaktif ışınım soğurumu için değerler alınmıştır. Çalışma sonucunda klinoptiloit zeolit-sıva harcı karışımlarında; %30 klinoptiloit zeolit örneğinde 0.48 Bq ile en yüksek radyoaktif ışınım soğurumu değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Klinoptiloit zeolitli sıvanın radyoaktif ışınım soğurum değerinin üleksitli ve kolemanitli sıvalara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda klinoptiloit zeolitli sıvaların radyoaktif ışınım olan ortamlarda kullanımı önerilmektedir. Ayrıca klinoptiolit zeolitin en iyi soğurum değerini verdiği %30 malzeme-%70 sıva harcı oranında klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanit için ısı yalıtkanlığı, su emme, ses iletim, basınç mukavamet ölçümleri yapılarak ve antibakteriyel özellikler incelenerek inşaat malzemesi olarak kullanımları açısından veriler değerlendirilmiştir. Su emme ölçümlerinde %20.35 ile kolemanitli sıva; en düşük ısı iletkenliğine 0.3384 W/mK ile üleksitli sıva; en az ses iletkenliğine 46.55 dB ile klinoplitoitli sıvanın sahip olduğu ölçülmüştür. Basınç mukavameti ölçümlerinde %100 sıva harcının 4.028 mPa ile en yüksek dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Radyoaktif ışınım, basınç mukavameti, ısı yalıtımı, ses iletimi*

Ali Deniz Küçüközer, alidenizkucukozer@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6831-2889
Tuana Kaya, tkaya7749@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-2870-5650
İrem Yalçın, iremylcn798@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-0779-5612
[*]Nuriye Sibel ÖZATLI, nozatli@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9652-1780

Comparison of radioactive radiation absorption, compressive strength,thermal insulation and antibacterial properties of ulexite, colemanite, clinoptiloite zeolite plasters

Abstract

In this study, it was aimed to investigate the usability of plasters with urexite, colemanite and clinoptiloid zeolite as construction materials in terms of radioactive radiation absorption, thermal insulation, water retention capacity, sound insulation, antibacterial properties and compressive strength. Clinoptiloite zeolite, urexite and colemanite were obtained and mixed in certain proportions and applied on aerated concrete. The plaster samples were repeated ten times and values were taken for radioactive radiation absorption using a Geiger Müller detector. As a result of the study, it was determined that the highest radioactive radiation absorption value with 0.48 Bq in 30% clinoptiloite zeolite-render mortar mixtures was found in the clinoptiloite zeolite sample. It was determined that the radioactive radiation absorption value of the plaster with clinoptiloite zeolite was higher than the plasters with urlexite and colemanite. In this context, it is recommended to use clinoptiloite zeolite plasters in environments with radioactive radiation. In addition, thermal insulation, water absorption, sound transmission, compressive strength measurements and antibacterial properties were made for clinoptiloid zeolite, urexite and colemanite at 30% material-70% plaster mortar ratio where clinoptiloid zeolite gives the best absorption value and the data were evaluated in terms of their use as construction materials. In water absorption measurements, the lowest thermal conductivity was 20.35% for colemanite plaster; the lowest thermal conductivity was 0.3384 W/mK for urlexite plaster; and the lowest sound conductivity was 46.55 dB for clinoplitoite plaster. In compressive strength measurements, it was determined that 100% plaster mortar had the highest strength with 4.028mPa.

Keywords: *Radioactive radiation, compressive strength, thermal insulation, sound transmission*

1. Giriş

Deniz kıyısındaki volkanların patlaması ve yüzeye çıkan lavların deniz suyuyla karışmasıyla milyonlarca yıl önce mikro gözenekli bir kaya yani zeolit oluşmuştur. Zeolitin keşfinden yaklaşık 200 yıl sonra kimyacılar Weigel ve Steinhoff'ın araştırmalarında kullanmışlardır. Çalışmalarında zeolitin küçük molekülleri emme özelliğinin oldukça gelişmiş olduğunu görmüşlerdir. Bu özelliğin kaynağı ise yapısındaki kanala benzer boşluklardır. Zeolitin gelişmiş emme özelliğinin ortaya konulması da endüstriyel alanda bolca kullanılmasına yol açmıştır. Ülkemizin zeolit rezervi yaklaşık 50 milyar tondur [1].

Zeolitlerin ağır olmaması, gözenekli yapısı, iyon değişikliği yapabilmesi, absorbsiyon özelliğinin yüksek olması ve açık renkli olmaları farklı endüstriyel alanlarda ham madde olarak kullanılmasına neden olmuştur. Bu alanlardan bazıları kirlilik kontrolü,

enerji, tarım, hayvancılık, maden ve metalürjidir [2]. Zeolitin inşaat sektöründe, boyar madde giderimi ve derin sulardaki radyoaktivite seviyesine etkisi araştırılmıştır [3-6].

Teknolojinin gelişmesiyle elektronik aletler gelişmiş ve hayatımızın her alanına girmiştir. Bununla birlikte maruz kaldığımız radyasyon miktarı da artmıştır. Radyasyon, canlılarda hücresel ve moleküler düzeylerde kimyasal, biyolojik ve fiziksel çeşitli değişikliklere yol açar [7].

Radyasyon, elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar biçimindeki enerji yayılımıdır. İyonlaştırıcı olan ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere iki türü vardır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun enerjisi düşük ve giriciliği çok azdır, kızılötesi dalgalar, mikrodalga, radyo dalgaları örnek olarak verilebilir. İyonlaştırıcı radyasyonun ise enerjisi ve giriciliği yüksektir. Buna örnek olan X ve gamma ışınları yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon; alfa ve beta ışınları ise yüksek enerjili parçacık radyasyonudur. Alfa ve beta radyoaktif elementlerin atom çekirdeğinin parçalanmasıyla oluşan radyoaktif parçacıklardır. Bazı elementlerin çekirdeği kararsız yapıya sahiptir, yani nötron sayısının proton sayısına oranı büyüktür. Bu kararsız çekirdekler kararlı hale gelebilmek için kendiliğinden alfa(α), beta(β) gibi yüklü parçacıklar ve gamma(γ) ışını yayarlar. Bu olaya radyoaktiflik veya radyoaktif bozunma denir [8].

Maruz kalınacak radyasyon etkilerinin gözden geçirilerek net bir yarar sağlamayan radyasyon uygulamalarına izin verilmemesi günümüzde radyasyondan korunmak için kullanılan yöntemlerden biridir. Uygulamanın sağlayacağı yararın ortaya çıkacak zarara değeceğine karar verilmesiyle maruz kalınacak radyasyon miktarının en az seviyeye indirilmesi sağlanmaktadır [9]. Dış radyasyondan korunmanın üç ana kuralı vardır. Bunlar; zaman, mesafe ve zırhlamadır. Zırhlama, radyasyon kaynağı ile korunmak istenen kişiler arasına kurşun, tuğla, beton gibi malzemelerin konulmasıdır. Zırhlama malzemesi radyasyon miktarını azaltan malzemedir. Zırhlama işlemi, cihazın zırhlanması ve cihazın içinde bulunduğu odanın zırhlanması olmak üzere iki şekilde yapılır. Genellikle zırhlama, radyasyon tehlikesini önlemede en etkin yoldur. Radyasyon türüne göre zırhlama malzemesi değişkenlik gösterir. Alfa ışınları bir kâğıttan, beta ışınları ise alüminyumdan geçemezken x ve gama ışınlarından korunmak için kurşun kullanılır [10-11]. Örneğin, hastanelerdeki röntgen odaları gibi radyasyonun yoğun olduğu bölgelerde duvarlar arasında zırh malzemesi olarak kurşun bulunmaktadır. Kurşun günümüzde çok tercih edilmesine rağmen pratik bir çözüm olmaması, çevreye zararlı olması, ağır olması ve pahalı olması nedeniyle; yapıya ek yük getirmeyecek, elverişli, canlı sağlığına zararı olmayan kurşuna alternatif seçeneklere ihtiyaç vardır [12]. Bu amaçla nükleer reaktörlerde kullanılan malzemelerden birisi de bordur. Borla malzemelerin zırhlanması sonucu ortama geçen radyasyon miktarının azaldığı ortaya konulmuştur [13]. Fakat bor türevleri de mali açıdan uygun değildir.

Son yıllarda bakteri ve virüslerin dirençli hale gelmesiyle yapı malzemelerinde kullanılan bakteri karşıtı uygulamalar yetersiz kalmış ve antibakteriyel uygulamalarda yeni yöntemlerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır [14]. Mikroorganizmaların tekrar çoğalmasını önlemek için betonun iç yapısının değiştirilmesi ile çeşitli alanlarda kullanılan antibakteriyel özelliklerin betona kazandırılması istenmiştir. Bu doğrultuda çimento katkılı bileşim malzemelerine üretim aşamasında TiO2 eklenerek kendi kendini temizleme özelliği kazanmaları ve yüzey kirleticilerinden arınmalarını sağlayan çalışmalar bulunmaktadır. Bu alanda zeolitler; iyon değişimi, adsorpsiyon yetenekleri ve katalizör olarak kullanılabildikleri için tercih edilmiştir. Literatürde zeolit ile

tekstilde, kimyasallarda ve film kaplamada antibakteriyel özellik kazandırma çalışmaları yapılmıştır ama doğrudan inşaat sektöründeki yapı malzemelerinde yapılmamıştır [15].

Betonarme yapılar ve yapı elemanları kullanıldıkları süre boyunca eğilme bükülme, basınç gibi farklı dış yüklerle karşı karşıya kalırlar. Söz konusu yapıların kullanım ömrünü uzatmak için dış yüklere karşı basınç dayanım değerinin artması gerekmektedir. Basınç dayanımı, betonların sertleştikten sonra üzerlerine etki eden yüklere karşı gösterdiği maksimum dirençtir. Basınç dayanımının liman, baraj, köprü, viyadük, uçak pistleri gibi yapılarda yüksek olmasına dikkat edilir [16]. Fakat gelişen silah teknolojisiyle birlikte özellik de konu nükleer tehdit olduğunda uzmanlar ancak yer altındaki sığınak türü yapıların tamamen koruma sağlayabileceğini öngörmektedir. Bu durum sığınaklarda kullanılan betonarme yapı ve yapı malzemelerinin basınç dayanımın önemini vurgulamaktadır [17].

Gürültü kirliliği, insanlarda hipertansiyon, stres, uyku bozuklukları, kulak uğuldaması gibi çeşitli sorunlara yol açabilir. Gürültü kontrolünü sağlamak için ses emici paneller olarak sentetik, gözenekli ve elyaflı akustik malzemeler kullanılmaktadır. Ancak bu iş için sıklıkla tercih edilen köpük, taş yünü ve cam yünü gibi ürünler hem insan sağlığına hem de çevreye zarar vermektedir [18-19].

Günümüzde sınırlı enerji kaynakları nedeniyle enerjinin verimli kullanılması büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yükselen enerji maliyetleri, enerji verimli yapılar kavramına yönelik taleplerde belirgin bir artışa sebep olmuştur. Binaların dış duvarlarının uygun tasarımı ve seçimi enerji verimliliğini arttırabilmektedir [20]. Uygun yapı malzemenin seçilebilmesi için kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarının bilinmesi gerekmektedir. Bir malzemenin ısı iletkenlik katsayısı küçüldükçe ısı yalıtım performansı artış gösterir [21].

Bir yapının yüzey kaplamasındaki gözenekli bir yapı taşı, yağmur ya da yüzey suları ile teması sonucunda kılcallık olayı etkisiyle suyu emer. Bu olay sonucunda yapı içine giren su; yapı malzemesinin nem içeriği ile sıcaklığının değişmesine sebep olmakta ve malzemede büzülme, şişme gibi hacimsel sorunlara yol açmaktadır [22]. Hâlihazırda inşa edilmiş yapılarda da kılcallık ile su emmeye bağlı olarak bozulmalar meydana gelebilir. Özellikle tarihi yapılarda bulunan sanat değeri yüksek motiflerin önemli derecede bozulduğu gözlemlenmiştir. Gelişen bu tarz nemlenme zararlarının azaltılması için uygun malzeme seçiminin yapılması gerekmektedir [23].

İnşaat sektöründe kullanılacak malzemelerin sadece bir özellik açısından değil, birkaç özellik açısından yüksek değerlere sahip olması çevresel etkileri azaltması, yapısal ve maliyet açısından önem arz etmektedir. İnşaat malzemelerinde basınç dayanımı, ses ve ısı izolasyonunun yanı sıra son yıllarda antibakteriyel özellikte ön plana çıkmıştır.

Geçmişten günümüze tıp, tarım, endüstri ve askeri gibi birçok alanda kullanılan yöntem ve araçlar gelişme göstermiş buna bağlı olarak canlıların maruz kaldığı radyasyon miktarı gün geçtikçe artmıştır. Radyasyondan korunmak için kullanılan yöntemlerden en çok tercih edileni zırhlama yöntemidir. Günümüzde kullanılan zırhlama malzemelerinin ekonomik olmamasından ve bu alanda daha etkili bir alternatifin bulunmamasından kaynaklanan soruna bu çalışmada tasarlanan sıva harcının çözüm üreteceği düşünülmektedir. Çalışmamızda Klinoptiloit zeolit, Üleksit, Kolemanit

uygulama kolaylığı sağlaması açısından hazır sıva harcıyla belirli oranlarda yer değiştirilmiştir. Ülkemizde rezervi bulunan klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanit karışımları ile geliştirilen sıvaların radyoaktif ışınım soğurumu, ısı yalıtkanlığı, su emme, ses iletim, antibakteriyel özellik ve basınç dayanımı deneysel çalışmalarla tespit edilerek inşaat sektöründe kullanılabilirliği incelenmiştir. Eski ve yeni binalarda kullanılabilecek Türkiye'de rezervi bulunan bir sıva malzemesinin tespit edilmesinin halk sağlığının korunmasının yanı sıra milli sermayeye ve literatüre katkı sağlayacağını düşünmekteyiz.

2. Malzeme ve methodlar

Bu bölümde yapılan çalışmada kullanılan cihazların, malzemelerin ve yöntemin tanıtımı yapılmıştır.

2.1. Malzemeler ve sıvaların hazırlanması

2.1.1. Klinoptiloit zeolit

Klinoptiloit zeolitler (Şekil 1, Şekil 2); yapısında Na, K gibi alkali ve Mg, Ca, Ba, St gibi toprak alkali elementler bulunduran, kristal yapıda sulu alümina silikatlardan, üç boyutlu kristal bir yapıdadır [1].

Şekil 1. Toz halinde klinoptiloit zeolit

Şekil 2. Taş halinde klinoptiloit zeolit

2.1.2. Kolemanit

Kristalize, özellikleri açısından elmasla benzerlik gösteren ve elmas kadar sert olan kolemanit bor bileşikleri içinde en yaygın olanıdır (Şekil 3). Dünyada ABD'de; Türkiye'de ise Balıkesir, Kütahya ve Bursa'da bulunur [24].

2.1.3. Üleksit

Doğada sütun, lifsi ve masif şeklinde bulunur(Şekil 4). Üleksit sıcak su içerisinde daha kolay çözünür. Dünya bor rezervinin %73'üne sahip olan Türkiye'de zengin bor yatağı Balıkesir, Eskişehir ve Kütahya'da bulunmaktadır. Üleksit mineralinin kullanıldığı birçok alana boraks ve borik asit üretimi, ses ve ısı izolasyonu, seramik, cam ve gübre endüstrisi örnek olarak verilebilir [24-26].

2.1.4. Gaz beton

Gaz beton, kolay işlenebilir, gözenekli yapıya sahip ve ısı yalıtkanlığı yüksek bir yapı malzemesidir (Şekil 5). Sönmemiş kireç, yüksek silisli bir dolgu maddesi, çimento ve alüminyum tozu içerir. Gözenekli olmasını sağlayan alüminyum tozudur. Yapısındaki maddelerin; %59'u uçucu kül, %33'ü çimento, %8'i kireç ve %0,07'si alüminyum

şeklindedir. En önemli ve en ayırıcı özelliği gözenekli bir yapıda olmasıdır. Toplam gözeneklikleri hacimsel olarak %75- %90 arasında değişen gaz betonlar en fazla kullanılan gaz beton tipleridir [27].

Şekil 3. Kolemanit

Şekil 4. Üleksit

Şekil 5. Kullanılan gaz beton

2.1.5. Hazır sıva harcı

Dış ve iç cephelerde yüzeyde ısı yalıtım amaçlı kullanılan mantolama sıvısıdır. Çimento esaslıdır [28]. Hazır sıva harcının teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hazır Sıva Harcının Özellikleri

Kullanılacak su miktarı	**5,5-6,5 L**
Hazırlanan harcın olgunlaşma süresi	5 dakika
Hazırlanan harcın kullanılabilme süresi	2 saat
Uygulama kalınlığı	4 mm
Tüketim	4-5 kg/m^2

2.1.6. Sıvaların hazırlanışı

Klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanit farklı oranlarda hazır sıva harcı ve suyla karıştırılmıştır. Elde edilen sıva harçları gaz betonlara uygulanmış ve farklı boyutlardaki iki kalıba dökülmüştür. Sıva uygulanan gaz betonlar; radyoaktif ışınım geçişi, ısı iletimi ve ses yutumu ölçümlerinde kullanılmıştır. 5x5x5 boyutundaki kalıba dökülen sıvalar basınç dayanım ve su emme ölçümlerinde kullanılmıştır. 2x2x2 boyutundaki kalıba dökülen sıvalar antibakteriyel özelliğin araştırılmasında kullanılmıştır. Hazırlık aşamaları Şekil 10,11 ve 12'de gösterilmiştir.

Şekil 6. Malzemelerin karıştırılması

Şekil 7. Sıvaların gaz betonlara uygulanması

Şekil 8. Sıva uygulanan gaz beton

Gaz betonlara uygulanan sıvaların malzeme miktarı, malzeme oranları, su miktarı ve kalınlıkları Tablo 2'de verilmiştir. Uygulamanın yapıldığı gaz betonların eni 10 cm, boyu 25 cm'dir. Sıvaların hazırlanması esnasında kullanılan su ve malzeme miktarları,

uygulanacak sıva kalınlıkları yapı sektöründe çalışan sıvacılar ile görüşüldükten sonra belirlenmiştir.

Tablo 2. Gaz betonlara uygulanan sıvalarda kullanılan malzemeler ve oranları

Malzeme	Malzeme Miktarı (g)	Su Miktarı (ml)	Malzeme Oranı (%)	Sıva Kalınlığı (cm)
Sıva Harcı	400	230	%100 Sıva Harcı	1
Klinoptiloit Zeolit-Sıva Harcı	400	200	%50 Klinoptiloit Zeolit-%50 Sıva Harcı	1
Klinoptiloit Zeolit-Sıva Harcı	400	200	%40 Klinoptiloit Zeolit-%60 Sıva Harcı	1
Klinoptiloit Zeolit-Sıva Harcı	400	150	%30 Klinoptiloit Zeolit-%70 Sıva Harcı	1
Üleksit- Sıva Harcı	400	170	%30 Klinoptiloit Zeolit-%70 Sıva Harcı	1
Kolemanit- Sıva Harcı	400	150	%30 Klinoptiloit Zeolit-%70 Sıva Harcı	1
Klinoptiloit Zeolit-Sıva Harcı	400	190	%20 Klinoptiloit Zeolit-%80 Sıva Harcı	1

Basınç dayanımı ve su emme ölçümleri için hazırlanan sıvaların kalıplara dökülmesi gerekmektedir. Bu 5x5x5'lik kalıplar Şekil 13'de görüldüğü gibidir. Kalıplara dökülen sıvalarda kullanılan malzemeler miktarları ve oranları, su miktarları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. 5x5x5 Boyutundaki sıvalarda kullanılan malzemeler ve oranları

Malzeme	Malzeme Miktarı (g)	Su Miktarı (ml)	Malzeme Oranı (%)	Kalınlık (cm)
Klinoptiloit Zeolit	200	100	%30 Klinoptiloit zeolit-%70 Sıva harcı	5
Üleksit	200	100	%30 Üleksit-%70 Sıva harcı	5
Kolemanit	200	100	%30 Kolemanit-%70 Sıva harcı	5
Hazır Sıva Harcı	200	100	%100 Sıva harcı	5

Kalıplara dökülen sıvalar kalıp içinde 1 gün kalıptan çıkarıldıktan sonra da 14 gün boyunca bekletilmiştir. Elde edilen numune örneği Şekil 14'te gösterilmiştir.

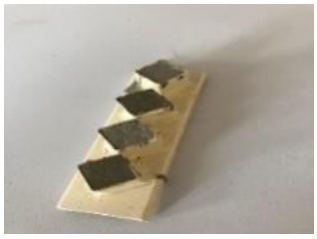
Şekil 9. Sıvaların kalıplara dökülmesi

Şekil 10. 5x5x5 boyutundaki sıva

Antibakteriyel özelliklerin araştırılması için hazırlanan sıvalar 2x2x2 boyutundaki kalıplara dökülmüştür (Şekil 15, 16). Kalıplara dökülen sıvalarda kullanılan malzemelerin miktarları ve oranları, su miktarları Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. 2x2x2 Boyutundaki sıvalarda kullanılan malzemeler ve oranlar

Malzeme	Malzeme Miktarı (g)	Su Miktarı (ml)	Malzeme Oranı (%)	Kalınlık (cm)
Klinoptiloit Zeolit	10	6	%30 Klinoptiloit Zeolit-%70 Sıva harcı	2
Üleksit	10	3	%30 Üleksit-%70 Sıva harcı	2
Kolemanit	10	4	%30 Kolemanit-%70 Sıva harcı	2
Hazır Sıva Harcı	10	4	%100 Sıva harcı	2



Şekil 11. Sıvaların kalıplara dökülmesi

Şekil 12. 2x2x2 boyutundaki sıvalar

2.2. Test ve ölçüm yöntemleri

Toz malzemelerin ölçümlerinde hassas terazi kullanılmıştır. Taş halindeki klinoptiloit zeolitler havanlarda ezilerek toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen malzemeler (klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanit) su ve sıva harcı ile belirlenen oranlarda karıştırılmıştır. Elde edilen sıva karışımları gaz betonlar üzerine uygulanmıştır.

2.2.1. QTM-500 cihazı

Seramik, tuğla, plastik ve beton gibi çeşitli yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarını ölçmede kullanılır. Bu cihazda prensip olarak sıcak tel metodunu kullanılmaktadır. Sıcak tel metodunda maddelerin ısı iletkenliği, metal bir tel ısıtılarak maddenin zaman içindeki sıcaklığındaki artışa göre belirlenir. QTM-500 cihazının teknik özellikleri; 0.023-11.63 W/mK ölçüm aralığı, %5 ölçüm hassasiyeti, (-10)- 200ºC sıcaklık aralığı, 120x60x20mm minimum örnek boyutu şeklindedir (Şekil 6) [29].

2.2.2. Geiger Müller detektörü

Bilimsel araştırmalarda parçacık sayısının tespit edilmesi için kullanılır ve birçok çeşidi vardır. Çeşitlerine gazlı detektörler, sintilasyon detektörleri, yarı iletken detektörler örnek verilebilir. Bu projede gazlı detektör olan Geiger Müller detektörü kullanılmıştır. Geiger Müller detektörü (Şekil 7) alfa, beta, gama olarak bilinen rasyasyon ışınları tespit eder ve sayar. Yüksek gerilim kullanarak çalışır. Geiger Müller detektöründe parçacık enerjisinin ölçülmesi veya parçacık cinslerinin birbirinden ayrılması mümkün değildir. Bu çalışmada kullanılan Geiger Müller detektörünün özellikleri; 9 V besleme gerilimi, 315 mW gücü ve 250-600 V tüp voltajı bulunmaktadır. Geiger Müller sayacıyla Bekerel (Bq) biriminden ölçüm yapılır. Bekerel (Bq) birimi ile çekirdeğin birim zamandaki bozunma sayısı tespit edilir [30].

2.2.3. Desibelmetre

Ses iletkenlik ölçümünde kullanılan cihaz desibel metredir. Desibelmetreler (Şekil 8) ses basıncını ölçerek sesin seviyesini belirleyen cihazlardır. Ses desibelmetrenin içerisine mikrofon sayesinde alındıktan sonra cihaz içerisinde değerlendirilir ve ölçüm sonuçları cihaz ekranında desibel cinsinden görüntülenir. Hata payı: ±1. 4dB

Şekil 13.QTM 500 cihazı

Şekil 14.Geiger müller dedektörü

Şekil 15. Desibelmetre

2.2.4. Otomatik çimento basma deney presi

Basınç mukavamet ölçümlerinde kullanılan cihaz çimento basma deney presidir (Şekil 9). Bu cihazda, küp şeklindeki numunelerde bozulmalar gözlenene kadar sabit bir yükleme hızıyla kuvvet uygulanır bu sayede mm^2 başına düşen mPa değeri hesaplanmaktadır. Çimento basma deney pres cihazının teknik özellikleri: Kapasite: 250kN, Yükleme hızı: 0,5kN/sn.

Şekil 16. Otomatik çimento basma deney presi

2.2.5. Radyoaktif ışınım geçiş ölçümü

Radyoaktif ışın geçiş ölçümleri ilimizdeki üniversitenin fizik laboratuvarında uzman gözetiminde yapılmıştır. Öncelikle radyoaktif ışınım soğurulmasında klinoptiloit zeolitin etkili olup olmadığını belirlemek amacıyla yirmi saniyelik periyotlarda Geiger Müller detektörü kullanılarak ölçümler yapılmıştır (Şekil 17, Şekil 18). Kaynak-dedektör arası madde yokken ölçülen değer 5.35 Bq, saf klinoptiloit zeolit kullanılan ön ölçümde elde edilen değer ise 1.7Bq'dir. Yapılan ön ölçümlerle saf klinoptiloit zeolitin radyoaktif ışınım soğurumunda etkili olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 17. Zeolitile ön ölçümün yapılması

Şekil 18. Zeolitile ön ölçümün yapılması

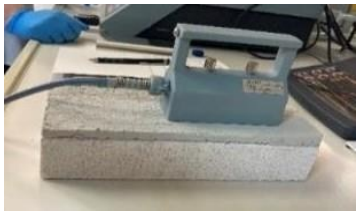
Gaz beton üzerine uygulanmış sıvalar Geiger Müller dedektörü ve kullanılan radyoaktif kaynak olan Radyum 226 arasına yerleştirilmiştir. Her oran için 30 saniyelik onar ölçüm yapılmıştır. Her ölçümde Radyum ile dedektör arasındaki mesafe ve sıvaların kalınlığı sabit tutulmuştur. Bu ölçümlere ek olarak radyoaktif kaynak ve dedektör arasında malzeme yokken ve gaz beton sıvasız iken kontrollü deneyler için ölçümler yapılmıştır (Şekil 19).

Şekil 19. Radyoaktif ışınım geçiş ölçümü

2.2.6. Isı iletkenlik katsayısının ölçümü

%30 malzeme-%70 sıva harcı oranındaki sıvaların gaz betona uygulanmasıyla elde edilen örneklerin ve %100 sıva harcı uygulanmış gaz betonun termal iletkenlik katsayıları QTM-500 ısı iletkenliği ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Her örnek için 1 dakikalık üçer ölçüm yapılmıştır. Isı iletkenlik katsayısı ölçümleri ilimizdeki üniversitenin kimya bölümünde yapılmıştır (Şekil 20, Şekil 21).

Şekil 20. Isı iletkenlik katsayısının ölçümü



Şekil 21. Isı iletkenlik katsayısının ölçümü

2.2.7. Basınç mukavamet ölçümü

5x5x5 boyutunda%30 malzeme-%70 sıva harcı oranındaki örneklerin beton pres cihazı ile basınç mukavametleri ölçülmüştür. Her örnek için üçer kez ölçüm alınmıştır. Aynı ölçüm %100 sıva harcı kullanılarak elde edilen örnekle de yapılmıştır. Basınç mukavamet ölçümleri ilimizdeki üniversitenin inşaat mühendisliği bölümünde yapılmıştır (Şekil 22).

Şekil 22. Basınç mukavamet ölçümü

2.2.8. Su emme ölçümü

5x5x5 boyutunda hazırlanmış örnekler hassas terazide tartılarak kuru kütleleri belirlenmiştir. Ardından 500 ml su içinde 24, 48 ve 72 saat boyunca bekletilmiştir (Şekil 23). Belirtilen süreler sonunda tekrardan kütleleri ölçülerek sıvaların ne kadar su emdikleri ölçülmüştür (Şekil 24).

Şekil 23. Sıvaların suda bekletilmesi

Şekil 24. Sıvaların tartılması

2.2.9. Ses iletkenliği özelliklerinin incelenmesi

%30 malzeme-%70 sıva harcı oranındaki sıvaların gaz betona uygulanmasıyla elde edilen örneklerin beşer adeti, %100 sıva harcı ile yapılan örneklerin 5 adeti ve sıvasız gaz betonların 5 adeti ses yutum özellikleri ölçümünde kullanılmıştır. Gaz betonlar sıvalı kısmı dışarıda kalacak, aralarında boşluk kalmayacak şekilde ve arasına sabit şiddetli ses kaynağı konularak Şekil 25'deki gibi yerleştirilmiştir.

Şekil 25. Gaz betonların yerleştirilmesi

Şekil 26. Ses iletkenliği ölçümü

Ses kaynağı ile aynı hizada, kaynağa 1.5 metre mesafede bulunan bir desibelmetre ile ölçümler alınmıştır. Kaynak ve desibelmetre arasında engel yokken de ölçüm alınmıştır. Her malzeme için 30 saniyede 10 ölçüm alınmış ve ortalamaları hesaplanmıştır (Şekil 25, Şekil 26).

2.2.10. Antibakteriyel özelliğin araştırılması

2x2x2 boyutunda %30 malzeme-%70 sıva harcı ve %100 sıva harcı oranındaki örneklerin antibakteriyel özellikleri incelenmiştir. Malzemelerimizin antibakteriyel etkinliklerinin sayısal olarak tespitinde, ASTM E2149 test yöntemi kullanılmıştır. Deneysel süreçte, Staphylococcusaureus (ATCC 6538) Gram-pozitif bakteri suşu olarak seçilmiştir. Numunelere, $2x10^5$ cfu/mL yoğunlukta Staphylococcusaureus bakteri çözeltisi ilave edilmiş, 37ºC'de 100 devir/dakika çalkalama hızında ilk olarak 2. 5 saat, devamında 24 saat süre ile inkübe edildikten sonra seri sulandırmalar yapılarak besi yerlerine ekimler yapılmış ve antibakteriyel etkinlik değeri tespit edilmiştir.

3. Sonuç ve tartışma

Çalışmanın amacı doğrultusunda farklı miktarlarda ve oranlarda sıva harcıyla karıştırılan klinoptiloit zeolit, kolemanit, üleksitle elde edilen örneklerin radyoaktif ışınım geçiş, ısı iletkenlik katsayısı, basınç dayanımı, ses iletkenliği, su emme ölçümleri ve antibakteriyel özellikleri incelenmiştir. Bu kısımda çalışmanın sonuçları sunularak tartışılmıştır.

3.1. Su emme ölçümü sonuçları

Sıvaların kütlece su emme yüzdeleri hesaplanırken %100 sıva harcı ve %30 malzeme-%70 sıva harcı oranında 5x5x5 küp şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin 24,48 ve 72 saat suda bekletilmesiyle ölçümler tamamlanmıştır. Zaman geçtikçe her malzeme için su emme yüzdeleri çok az artmakla birlikte ölçümler sonunda kütlece su emme yüzdesi en yüksek olan sıva yaklaşık %30 ile klinoptiloit zeolitli sıva en az olan sıva ise yaklaşık %17 ile üleksitli sıva olmuştur. Tablo 5'de sıvaların 24, 48 ve 72 saat sonraki su emme ölçümlerine ait sonuçlar sunulmuştur.

Tablo 5. Su emme ölçümleri sonucunda elde edilen bulgular

Malzeme	İlk Kütle	24 Saat Sonraki Kütle	24 Saat Sonundaki Kütlece Su Emme Yüzdesi	48 Saat Sonraki Kütle	48 Saat Sonundaki Kütlece Su Emme Yüzdesi	72 Saat Sonraki Kütle	72 Saat Sonundaki Kütlece Su Emme Yüzdesi
Hazır Sıva Harcı	152,4	183,3	%19,61	183,6	%20,47	183,9	%20,66
Klinoptiloit zeolit	145,1	189,1	%30,34	189,7	%30,73	190,8	%31,49
Üleksit	161,4	190,1	%17,78	189,8	%17,59	189,8	%17,59
Kolemanit	176,4	211,3	%19,78	211,8	%20,06	212,3	%20,35

Tablo 5'de görüldüğü gibi %30 malzeme - %70 sıva harcı oranındaki sıvaların su emme yüzdeleri %100 sıva harcının su emme yüzdesi ile karşılaştırıldığında ise %70 sıva harcı - %30 klinoptiloit zeolit oranındaki sıvanın %100 sıva harcına göre daha çok su emdiği, %30 üleksit - %70 sıva harcı ve %30 kolemanit - %70 sıva harcı oranındaki sıvaların ise daha az su emdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin zeolitin gözenekli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bağlamda nem yüzdesi yüksek olan bölgelerde ve binaların dış cephesinde kullanılmasının uygun olmadığı düşünülmektedir. Literatürde zeolit miktarının artmasına bağlı olarak su emme miktarında artış gözlemlenen çalışma bulunmaktadır [31].

3.2. Radyoaktif ışınım geçiş ölçümü sonuçları

Hazırlanan harçlar gaz beton üzerine 1 cm'lik tabaka halinde sıvandıktan sonra ölçümler alınmıştır. Tablo 6'da %50 klinoptiloit zeolit - %50 sıva harcı, %40 klinoptiloit zeolit - %60 sıva harcı, %60 klinoptiloit zeolit - %40 sıva harcı içeren sıvaların; Tablo 7'de sıvasız gaz beton %100 sıva harçlı gaz beton %30 Malzeme - %70 sıva harçlı sıvaların radyoaktif ışınım geçiş ölçüm sonuçları sunulmuştur.

Tablo 6. %50- %40- %60 Klinoptiloit Zeolit içeren sıvaların radyoaktif ışınım geçiş bulguları

ÖLÇÜM	%50 Klinoptiloit Zeolit-%50 Sıva Harcı	%40 Klinoptiloit Zeolit-%60 Sıva Harcı	%20 Klinoptiloit Zeolit-%80 Sıva Harcı
Radyoaktif Işınım Geçiş (Bq)	0,61	0,63	0,53

Tablo 6'da görüldüğü gibi %50 klinoptiloit zeolit - %50 sıva harcında 0,61 Bq, %40 klinoptiloit zeolit - %60 sıva harcında 0,63 Bq, %20 klinoptiloit zeolit - %80 sıva harcında 0,53 Bq ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucu kaynak ile detektör arası madde yokken 1,06 Bq geçiş değeri elde edilmiştir. Bu değerin sıvasız gaz betonda 0,64 Bq olmasından dolayı gaz betonun yapısındaki maddelerin de radyoaktif ışınları soğurduğu anlaşılmıştır. Aynı şekilde hazır sıva harcı için 0,56 Bq ölçülmesi hazır sıva harcının radyoaktif ışınım soğurum özelliğinin olduğunu göstermektedir. Klinoptiloit zeolit oranı farklı sıvalar arasında %30 klinoptiloit zeolit - %70 sıva harcı oranın en iyi soğurum değerine sahip olduğu görülmüştür (Tablo 7). Bunu sebebinin klinoptiloit zeolitin miktarı azaldıkça kafesli yapısının tutuculuğunun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

%30 malzeme - %70 sıva harcı oranında farklı malzemelerle yapılan sıvalar arasında en iyi değer 0.48 Bq ile klinoptiloit zeolitli sıvada elde edilmiştir. Üleksitli ve kolemanitli sıvalarda ise soğurum değerinin sırasıyla 0,63 Bq ve 0,61 Bq olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar " İnşaatlarda sıva malzemesi olarak klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanite göre zırhlama açısından alternatif bir malzeme midir? " sorumuzu desteklemektedir.

Zeolitin, kirli suların arıtılması[32], enerji tasarrufu sağlanması[33] ile ilgili araştırmalar literatürde yer almaktadır. Ancak inşaat sektöründe zeolitin sıva harcı ile karıştırılarak radyoaktif ışınım soğurumunda kullanılmasıyla ilgili çalışma bulunamamıştır. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farklı olmasını sağlayan niteliği de buradan gelmektedir. Bu çalışmanın sonucuna göre zeolitli sıva harçları radyoaktif ışınım soğurumu ölçümleri sonucunda üleksit ve kolemanitli sıvalara göre daha kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak zeolitin bor türevlerine kıyasla daha ekonomik oluşu ve daha iyi sonuç vermesi ayrıca kurşuna kıyasla da binalara yük getirmemesi ve zeolitli sıvaların eski binalara da uygulanabilecek oluşu zeolitin bu alanda kullanılabileceğini göstermektedir.

3.3. Isı iletkenlik katsayısı ölçümü sonuçları

QTM-500 cihazı ile %30 Malzeme - %70 sıva harcı oranındaki farklı malzemeler için gerçekleştirilen ölçümler en düşük ısı iletimine sahip olan sıvanın üleksitli sıva olduğunu ortaya koymuştur. Ancak üleksitli ve zeolitli sıvaların da %100 sıva harcına göre ısı iletiminin yaklaşık %50 oranında daha düşük olması ve zeolitli sıvanın maliyetinin üleksitli ve kolemanitli sıvalara göre daha düşük olması gibi kıstaslar göz önüne alınınca zeolitli sıva daha avantajlıdır. Ayrıca literatürde doğal klinoptiloit zeolit içeren harçların iyi bir yalıtım malzemesi olarak kullanabileceğini belirten çalışmalar da bulunmaktadır [34]. Tablo 7'de sıvasız gaz beton %100 sıva harçlı gaz beton %30 Malzeme - %70 sıva harçlı sıvaların ısı iletkenlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

3.4. Basınç mukavamet ölçümü sonuçları

Hazırlanan 5x5x5 küp şeklindeki sıvaların UTCM-6431 cihazı ile basınç dayanım ölçümlerine bakılmıştır. %100 hazır sıva harcı ile %70 sıva harcı - %30 malzeme oranındaki sıvalar arasından en iyi ölçüm değerini 4. 028 mPa ile %100 sıva harcı vermiştir. Ardından 1.789 ile üleksit katkılı sıva harcı gelmektedir. Literatürde zeolit katkılı harçlarda basınç mukavemet değerinin %100 sıva harcına göre daha düşük olduğunu belirten çalışma bulunmaktadır [35]. Tablo 7'de sıvasız gaz beton %100 sıva harçlı gaz beton %30 Malzeme - %70 sıva harçlı sıvaların ses iletkenlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

3.5. Ses iletkenlik ölçümü sonuçları

Ses iletkenlik ölçümleri, aynı malzeme ile sıvanan 5 gaz betonun aralarında boşluk kalmayacak ve ses kaynağı oluşturulan yapının içinde kalacak şekilde yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Ölçümler sonucu ses iletkenliği en fazla olan maddenin 48,33 dB ile %100 sıva harcı oranındaki sıva olduğu görülmüştür. Sıvasız gaz betonun ölçüm yapılan malzemeler arasında en iyi yalıtım malzemesi olmasının nedeninin gözenekli bir yapıda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En iyi soğurum değerinin sıvasız gaz betonda olmasına rağmen binalarda üzerine sıva uygulanmadan kullanılamaması gaz betonu bu alanda işlevsiz hale getirmektedir. İkinci en iyi soğurum değerine sahip %70 sıva harcı -%30 klinoptiloit zeolit oranındaki sıvanın ise ses yalıtımında alternatiflerine göre daha etkili olduğu yapılan ölçümlerle gösterilmiştir. Tablo 7'de sıvasız gaz beton %100 sıva harçlı gaz beton %30 Malzeme - %70 sıva harçlı sıvaların ses iletkenlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 7. Sıvasız gaz beton %100 sıva harçlı gaz beton %30 Malzeme - %70 sıva harçlı sıvaların radyoaktif ışınım geçiş, ısı iletkenlik, ses iletkenlik ve gerilme değerleri bulguları

Malzeme	Radyoaktif Işınım Geçiş (Bq)	Isı İletkenlik (W/mK)	Ses İletkenliği (dB)	Gerilme Değerleri (mPa)
Sıvasız Gazbeton	0,64	-	46,36	-
%100 Sıva Harçlı Gazbeton	0,56	0,6205	48,33	4,028
%30 Klinoptiloit Zeolit-%70 Sıva Harcı	0,48	0,3932	46,55	1,728
%30 Üleksit-%70 Sıva Harcı	0,61	0,3384	48,21	1,789
%30 Kolemanit -%70 Sıva Harcı	0,63	0,3772	48,06	0,823

3.6. Antibakteriyel özelliğin incelenmesi

Sıvaların ASTM E2149 test yöntemine göre antibakteriyel özellikleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucu %100 sıva harcı kullanılarak yapılan sıvada herhangi bir antibakteriyel etkinlik tespit edilmemiştir. %30 malzeme - %70 sıva harcı kullanılarak yapılan sıvaların hepsi bakteri gelişimi üzerinde negatif etki göstermiştir. Yapılan ölçümlerin devamında inhibisyon etkisinin 24 saat boyunca sürdüğü ve neredeyse hiç bakteri kalmadığı görülmüştür. En fazla antibakteriyel özellik sırasıyla zeolitli, üleksitli ve kolemanitli sıvada gözlenmiştir. Bunun nedeni kullanılan maddelerin kimyasal özelliklerine bağlanmaktadır.

Önceki yıllarda zeolitin sıva harcı, antibakteriyel katkı ve TiO2 ile karıştırılarak antibakteriyel etkinliğinin ve kendi kendini temizleme özelliğinin incelendiği bir çalışma yapılmıştır [36]. Ancak literatürde sadece hazır sıva harcı ve klinoptiloit zeolitin karıştırılmasıyla elde edilen sıvanın antibakteriyel etkinliği ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Çalışmamız inşaatlarda kullanılan hazır sıva harçları belirli oranlarda klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanit ile yer değiştirilirse radyoaktif ışınım geçişini ne kadar engelleyebileceği üzerine yapılandırılmıştır. Yapılan radyoaktif ışınım geçiş ölçüm sonuçlarından en iyi ölçüm %30 klinoptiloit zeolit - %70 sıva harcında (0,48 Bq) elde edildikten sonra inşaat sektöründe önemli olan ısı iletkenlik, ses iletkenlik, basınç

mukavemeti, su emme ve antibakteriyel özelliklere ait deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Sonuç olarak; radyoaktif ışınım geçişine ait en iyi değer 0,48 Bq ile klinoptiloit zeoitli sıvada elde edilmiştir. Su emme ölçümlerinde 72 saatlik ölçüm sonucunda %20,35 ile kolemanitli sıvanın en iyi olduğu tespit edilmiştir. Isı iletkenlik ölçümünde en düşük ısı iletimine sahip sıvanın üleksitli sıva olduğu ölçülmüştür (0,3384 W/mK). Basınç mukavemeti ölçümlerinde %100 sıva harcının (4,028 mPa) en dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ses iletkenlik ölçümlerinde 46,55 dB ile klinoptiloit zeoitli sıvanın en az ses iletkenliğine neden olduğu saptanmıştır. Sıvaların ASTM E2149 test yöntemi ile incelenen antibakteriyel özelliğe en fazla sahip olan sıvanın zeoitli sıva olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmamızdan elde edilen deneysel sonuçlar; " Klinoptiloit zeolit, üleksit ve kolemanit katkılı sıva harçlarının ses ve ısı iletimi, antibakteriyel özellik, su emme ve basınç mukavamet özellikleri birbirinden farklı mıdır? " " Klinoptiloit zeolit radyoaktif ışınım soğurulması ve maliyet açısından inşaat sektöründe kullanılacak alternatif bir malzeme midir?" sorularımızı desteklemiştir.

Günümüzde kullanılan zırhlama malzemelerinin ekonomik olmamasından ve bu alanda daha etkili bir alternatifin bulunmamasından kaynaklanan soruna bu çalışmada tasarlanan sıva harcının çözüm üreteceği düşünülmektedir. Geliştirilen sıvanın ısı ve ses yalıtımında kullanılabilir olması ve antibakteriyel özelliğinin bulunması kullanım kolaylığının yanı sıra daha avantajlı bir zırh malzeme olmasını sağlamaktadır.

Ayrıca klinoptiloit zeolit ülkemizde çıkarıldığından bu alanda kullanımının yaygınlaşması ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmanın klinoptiloit zeolitin radyoaktif ışınım soğurumunda kullanılabilirliği ile ilgili Türk Patentve Marka Kurumuna 2022/005112 dosya numarası ile "Faydalı Model" başvurusu yapılmış ve inceleme aşamasına gelmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda klinoptiloit zeolit katkılı sıva harcının radyoaktif ışınımı soğurma özelliğinden aşağıda belirtilen alanlarda kullanılması önerilmektedir.

1) Hava savunma silahlarının yaydığı radyasyonun önlenmesi için klinoptiloit zeolitli sıva harcı kullanılabilir.
2) Hastanelerde bulunan radyasyon yayan cihazların bulunduğu odaların duvarları antibakteriyel özelliğinin de olmasından faydalanılarak klinoptiloit zeolitli sıva ile sıvanabilir.
3) Askeri alanda hava radarlarının bulunduğu odalarda ve genelde alıcı cihazların bloklanmasında kullanılan jammerlarda da kullanılabilir.
4) Nükleer fizik laboratuvarlarında dışarıya yayılan radyasyon miktarının azaltılması için klinoptiloit zeolit içeren sıvalar kullanılabilir.
5) Radyoaktif kirliliğin olduğu bölgelerde evlerde kullanıma uygundur.

Kaynaklar

[1] Fakı, A., Reaktif tekstil boyar maddelerinin zeolit kolonda adsorpsiyon yolu ile giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2007).

[2] Gülen, J., Zorbay, F.ve Arslan, S., Zeolitler ve kullanım alanları**, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi**, 2(1), 63-68, (2012).

[3] Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, C., Çulfaz, A., Uzal, B., Doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımı. TÜBİTAK Araştırma Projesi, Proje No: 104M393,Ankara, (2007).

[4] Bideci, Ö.S., Bideci, A.ve Oymael, S., Zeolit katkılı çimentoların özelliklerinin incelenmesi, **SDÜ Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi**, 5(3), 70-76, (2013).

[5] Zal, B., Zeolit, tras ve uçucu kül ile tuğla üretimi ve standart tuğla ile karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2010).

[6] Küçükönder, E. ve Çetin, N.B., Zeolit mineralli filtrelerin derin kuyu sularındaki radyoaktivite seviyesine etkisinin araştırılması, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 23(1), 22-36, (2020).

[7] Kuş, K., Radyasyon nedir?, (2011).http://bilheal.bilkent.edu.tr/aykonu/ay2011/radyasyonturk.htm, (25.11.2022)

[8] Taylor, J.R., Zafiratos, C.D.ve Dubson, M.A., **Fen ve Mühendislikte Modern Fizik Kitabı**, Okutman Yayıncılık, Ankara, (2008).

[9] AFAD, Radyasyondan korunmada temel prensipler, (2021).https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyondan-korunmada-temel-prensipler, (22.11.2022)

[10] AFAD, İçsel ve dışsal radyasyondan korunma, (2021).https://www.afad.gov.tr/kbrn/icsel-ve-dissal-radyasyondan-korunma, (22.11.2022)

[11] Akkurt I., Başyiğit C., Mavi B., Günoğlu K., Kılınçarslan Ş.ve Akkaş A., Ağır agregaların radyasyon zırhlama özellikleri, **Engineering Sciences**, *6*(4), 1481-1485, (2011).

[12] Seven, A., Baritli hazır sıva kaplamalarının radyasyon zırh elemanı olarak kullanılabilirliğinin görüntü işleme yöntemi ile araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2011).

[13] Çalık, A., Akkurt, I., Akyıldırım, H. ve Günoğlu, K., Borun radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması, **5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)**, Karabük, (2009).

[14] Sakarya, G.K., ve Ubay, E., Antibakteriyel özellikli duvar karolarının geliştirilmesi,**Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 4(2), 106-112, (2021).

[15] Canbaz, M., Güldaş, M.ve Orhan, M., Zeolit katkısının antibakteriyel ve kendi kendini temizleyen harç özelliklerine etkisi, **Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,** 10(3), 987-998, (2021).

[16] Oltulu, M. Ve Altun, G.M., Betonun darbe yönlendirmesinin tespitinde ağırlık düşürme deneme yöntemi ve yapılan çalıştırma, **Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 8 (1), 155-163, (2018).

[17] Alkayış, M.H.ve Başyiğit, C., Lif katkısının beton darbe dayanımına etkisi, **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,** (24), 455-462, (2021).

[18] Kaya, A.İ.ve Dalgar, T., Ses yalıtımı açısından doğal liflerin akustik özellikleri, **Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,** 8(Özel (Special) 1), 25-37, (2017).

[19] Turan, O.ve Aslan, R., Bağlayıcı püskürtme tekniği ile üretilmiş gözenekli alçı yapıların ses yutma katsayılarının incelenmesi, **4th International Congress On**

3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry, Antalya, (2019).

[20] Geliş, K.ve Yeşildal, F., Klasik ve modern yapı elemanları kullanılması durumunda ısı iletim katsayısının değişimi ile minimum yalıtım kalınlığının tayini, **Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 10(4), 869-877, (2020).

[21] Köse, H., Pamukçu, Ç., Yalçın, N. ve Seçer, T., Pomza ve yapı malzemesi olarak kullanım olanakları, **Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu**, İzmir, (1997).

[22] Özdemir, A., Bazı yapı malzemelerin kapiler su emme potansiyelleri, **Jeoloji Mühendisliği Dergisi**, 26(1), 19-32, (2002).

[23] Dinçer, İ., Özvan, A., Akın, M., Tapan, M.ve Oyan, V., İgnimbiritlerin kapiler su emme potansiyellerinin değerlendirilmesi: ahlat taşı örneği, **Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 17(2), 64-71, (2012).

[24] Telli, Ö.F.G., Bor uç ürünleri ve üretim yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2008).

[25] Tekin, G., Kalsine üleksit'in amonyum klorür çözeltileri içinde çözünürleştirilmesi kinetiği, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 6(1), 100-114, (2004).

[26] Kütük, T., Sub-mikron boyutlarında üleksit mineralinin asfalt karışımların suya hassasiyetine etkisinin incelenmesi**, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 7(2), 141-152, (2017).

[27] Kartal, S., Ülkemiz inşaat sektöründe gaz beton kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, (2001).

[28] Bekar, M., Şapcı, N.ve Gündüz, L., Aksaray bölgesi volkanik tüf serilerinin sıva malzemesi olarak kullanımı, **IV. Ulusal Kırmataş Sempozyumu**, İstanbul, (2006).

[29] Geothermal Energy Research and Application Center, Thermal Conductivity Meter (KEM QTM 500), https://geocen.iyte.edu.tr/en/isi-iletim-katsayisi-olcme-cihazi-kem-qtm-500/, (07.12.2022)

[30] Uşaklı, A.B., Nükleer Radyasyon ve Etkileri, **Türk Silahlı Kuvvetleri Dergisi,** Ankara, (1997).

[31] Binici, H., Atık mukavva, alçı, pomza, perlit, vermikülit ve zeolit ile yapılan kompozitlerin yangın direncinin araştırılması, ***Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi***, *31*(1), 1-10,(2016).

[32] Gülen, J., Zorbay, F.ve Arslan, S., Zeolitler ve kullanım alanları, **Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi**, 2(1), 63-68, (2012).

[33] Bideci, Ö.S., Bideci, A. ve Oymael, S., Zeolit katkılı çimentoların özelliklerinin incelenmesi, **SDÜ Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi**, 5(3), 70-76, (2013).

[34] Türkmen, İ., Fındık, S.B., & Bingöl, A.F., Cam tozu, cüruf ve zeolit ile üretilen ve perlit agregası içeren harçların ısı iletkenlikleri ve mukavameti, **International ready mixed concrete congress proceedings,** İstanbul, Turkey (2008).

[35] Aruntaş, H.Y., & Beycioğlu, A.,Puzolanik Zeolit (Klinoptilolit) Katkılı Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, **Science and Engineering,** *1*(2), 57-67, (2014).

[36] Canbaz, M., Güldaş, M.ve Orhan, M., Zeolit katkısının antibakteriyel ve kendi kendini temizleyen harç özelliklerine etkisi, **Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,** 10(3), 987-998, (2021)

DOI:10.25092/baunfbed. 1659472 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 626-638, (2025)*

Effect of line-width parameter on the tensile strength, surface profile and printing time of 3D printed PLA parts

Ahmet Çağrı KILINÇ*

Osmaniye Korkut Ata University Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Fakıuşağı Campus, Osmaniye.

Geliş Tarihi (Received Date): 17.03.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 22.04.2025

Abstract

This study investigates the effect of line-width values on the properties of 3D (three dimensional) printed PLA (polylactic acid) parts. 3D printing of parts was carried out by using low-cost cartesian type FFF (fused filament fabrication) desktop 3D printer. Brass nozzle with a diameter of 0.6 mm was used to print PLA parts. Parts having line-width values of 0.6 mm to 1.2 mm were printed and the effect of line-width values on the mechanical properties and printing time was investigated. Mechanical properties of 3D printed parts were determined by using tensile testing device (Zwick/Roell, Z250). Microstructures of 3D printed samples were investigated by using optical microscope (Leica, DM 2500). Printing time for each part was recorded during 3D printing process. Surface profiles of parts were investigated by using surface roughness tester (Mitutoyo SJ-210). Microstructural investigations showed that the voids were formed between adjacent deposited lines and the void content decreased from 5.89% to 5.13% with increasing line-width value up to 1.0 mm. Surface roughness parameter of Ra increased from 5.11±0.21 µm to 9.29±1.12 µm with increasing line-width. Tensile strength of 3D printed specimens showed a slight decrease with increasing line-width due to the presence of voids between adjacent u-turn sections. The tensile strength values were determined as 58.52±1.93 MPa and 46.54±1.18 MPa for specimens printed with line-width values of 0.6 mm and 1.2 mm respectively. SEM images of tensile fracture surface demonstrated that the main failure mechanism of the printed specimens was the rupture of deposited lines instead of fracture of inter-line bonding.

Keywords: *3D printing, mechanical properties, characterization.*

* Ahmet Çağrı KILINÇ, ahmetcagrikilinc@osmaniye.edu.tr, https://orcid.org/0000-0003-1705-5676

Hat-genişliği parametresinin 3B yazdırılmış PLA parçaların çekme mukavemeti, yüzey profili ve yazdırma süresi üzerindeki etkisi

Öz

Bu çalışma, hat-genişliği değerlerinin 3B (üç boyutlu) yazdırılmış PLA (polilaktik asit) parçalarının özellikleri üzerindeki etkisini incelemektedir. Parçaların 3B yazdırma, düşük maliyetli kartezyen tip FFF (eriyik filament üretimi) masaüstü 3B yazıcı kullanılarak gerçekleştirildi. PLA parçaları yazdırmak için 0,6 mm çapında pirinç nozul kullanıldı. 0,6 mm ile 1,2 mm arasında hat genişliği değerlerine sahip parçalar basıldı ve hat genişliği değerlerinin mekanik özellikler ve yazdırma süresi üzerindeki etkisi incelendi. 3B yazdırılmış parçaların mekanik özellikleri, çekme test cihazı (Zwick/Roell, Z250) kullanılarak belirlendi. 3B yazdırılmış numunelerin mikro yapıları optik mikroskop (Leica, DM 2500) kullanılarak incelendi. 3D yazdırma işlemi sırasında her parça için yazdırma süresi kaydedildi. Parçaların yüzey profilleri yüzey pürüzlülük test cihazı (Mitutoyo SJ-210) kullanılarak incelendi. Mikroyapısal incelemeler, boşlukların bitişik depozitlenmiş hatlar arasında oluştuğunu ve boşluk içeriğinin 1,0 mm'ye kadar artan hat genişliği değeriyle %5,89'dan %5,13'e düştüğünü gösterdi. Yüzey pürüzlülük parametresi Ra, artan hat genişliğiyle 5.11±0.21 µm'den 9.29±1.12 µm'ye yükseldi. 3B yazdırılmış numunelerin çekme mukavemeti, bitişik u-dönüşü bölümleri arasındaki boşlukların varlığı nedeniyle artan hat genişliğiyle azalma gösterdi. Çekme mukavemeti değerleri, 0,6 mm ve 1,2 mm hat genişliği değerleriyle yazdırılmış numuneler için sırasıyla 58.52±1.93 MPa ve 46.54±1.18 MPa olarak belirlendi. Çekme kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri, yazdırılmış numunelerin ana hasar mekanizmasının, hatlar arası bağların kırılması yerine depozitlenmiş hatların kopması olduğunu gösterdi.

Anahtar kelimeler: *3B yazdırma, mekanik özellikler, karakterizasyon.*

1. Introduction

Additive manufacturing (AM) offers advantages such as low-cost production of customized products and design flexibility in complex geometries [1]. AM is defined as the layered manufacturing of parts based on digital design files. This technology covers the stacking of layers on top of each other to form the part [2] [3]. AM technology includes many production techniques such as binder jetting, selective laser sintering and melting (SLS and SLM), digital light processing (DLP) and fused filament fabrication (FFF). Among these techniques, the FFF method is one of the most widely used because of low cost and being easily accessible [4]. In the FFF method, polymeric filaments with a customized diameter of 1.75 mm are generally used [5]. The polymeric filament is transferred to the temperature-controlled heating area by a stepper motor. The polymeric material that transferred to the heating area melts and the melted polymer is deposited as an individual line extruded from the nozzle mouth to the build table. Deposited lines with a stable width are obtained by transfer of the filament at a certain speed by the stepper motor. Layers are obtained by deposition of individual lines adjacently in a controlled manner, and the final product is produced by depositing these layers on top of each other in a controlled manner [6].

Although many polymeric materials such as polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), thermoplastic elastomer (TPU), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), are used as filaments in 3D printing, PLA is one of the most popular thermoplastic materials used in FFF method because of its biodegradable, biocompatible characteristics and relatively high strength properties [7].

Properties of 3D printed PLA parts strongly depend on the printing parameters which are determined during the slicing process such as printing temperature, printing speed, infill ratio, infill type, layer thickness and build orientation and nozzle size [8]. The literature review showed that the effect of these parameters on the properties of 3D printed parts was widely studied in detail. Chacón et al. (2017) investigated the effect of build orientation, layer thickness and feed rate/flow rate on the mechanical properties of 3D printed PLA parts [8]. Kuznetsov et al. (2018) investigated the effect of nozzle diameter and layer thickness on the bonding strength between adjacent layers as a function of geometrical parameters of the FFF process [9]. Molina et al. (2025) focused on the effect of nozzle temperature, layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D printed specimens by using ABS and PLA filaments [10]. Although literature studies mainly focused on the effects of printing parameters on the mechanical properties of the parts, some studies examined the effects on printing time and surface properties in addition to mechanical properties. For example, Bhosale et al. (2022) investigated the effects of printing speed, layer thickness and infill percentage on the mechanical properties of the parts as well as the surface profile and printing time [11]. Although different printing parameters were examined in the literature as described above, the effect of line-width was ignored and there are limited experimental studies that examine the effect of line-width on mechanical properties, surface roughness, and production time [12-14].

Although the use of nozzles with different diameters is an option for the getting of wider deposited lines, the alteration of the line-width while using same nozzle is another simple way. Therefore, this study focused on the effect of line-width change on the properties of 3D printed parts while using same nozzle (0.6 mm). Effect of line-width change on the void content, surface profile and printing time as well as the mechanical properties such as tensile strength and hardness were investigated within the scope of the study.

2. Material and method

2.1. Material

Natural PLA filament with a filament diameter of 1.75 mm was used for 3D printing of parts. The filament was supplied by ESUN (Shenzhen, China). The filament contained no additives, pigments or coloring agents. Properties of the filament supplied by the manufacturer were given in Table 1.

Table 1. Properties of PLA filament

Properties	**Unit**
Melt Flow Index (MFI)	5 (190°C/2.16kg)
Density	1.23 g/cm^3
Heat distortion Temperature	53 °C

2.2. 3D Printing Process

3D printing of PLA parts was carried out by using custom made cartesian type desktop 3D printer whose printhead moves in the X and Z axis while the build plate moves in the Y axis. The 3D printer has a printing volume of 150 mm *150 mm *150 mm (x*y*z). The image of 3D printer and 3D printing process were shown in Figure 1. a and b respectively.

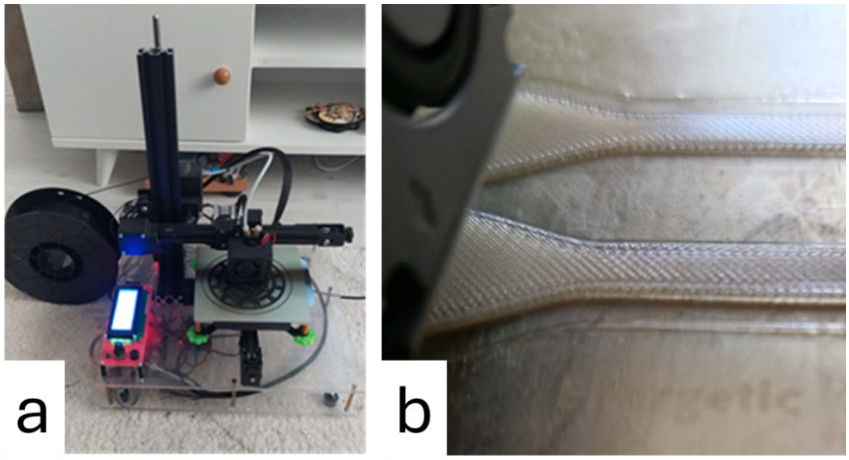


Figure 1. a) 3D printer and b) printing process

Slicing program was used to generate geometric code (gcode) files that contain instructions for controlling computerized machine tools and 3D printers such as tool path and printing settings in the form of G and M codes and comment lines [15]. Samples were produced by stacking deposited layers one top of another and the layers were formed by the sequential arrangement of individual deposited lines from the nozzle according to gcode file produced by slicing process of digital designs. The printing speed and printing temperature were fixed for all samples and kept in the manufacturer recommended limit values. All samples were printed at a nozzle temperature of 210 °C and 40 mm/s of printing speed. The printing speed refers to the movement speed of nozzle. The detailed 3D printing parameters were given in Table 2.

Table 2. 3D printing parameters

Parameter	**Unit**
Printing temperature	210 °C
Printing speed	40 mm/s
Bed temperature	60 °C
Infill type	Rectilinear
Infill density	100%
Infill angle	45°/-45°
Layer height	0.2 mm
Nozzle diameter	0.6 mm
Wall count	1
Line-width	0.6, 0.8, 1 and 1.2 mm

2.3. Characterization

Thermal behavior of PLA filament was investigated by thermogravimetric analysis (TGA). The TGA test was conducted by using thermal analyzer (Hitachi Exstar 7300). Samples were heated from room temperature to 600 °C with a heating ramp of 10 °C/min under nitrogen atmosphere. Tensile properties of samples were determined by using tensile testing. Tensile testing samples were printed according to ASTM D638 and tests were conducted by using universal testing device (Zwick/Roell, Z250) with a cross-head speed of 10 mm/min. Schematic representation and image of tensile test specimens are shown in Figure 2. Three replications were performed for tensile testing. Tensile fracture surface of samples was investigated by using scanning electron microscope (SEM) (JEOL/JCM-5000). Fracture surface of samples was sputter coated with Au-Pd prior to SEM observations to make surface of polymer conductive and prevent electron charging problems during examinations.

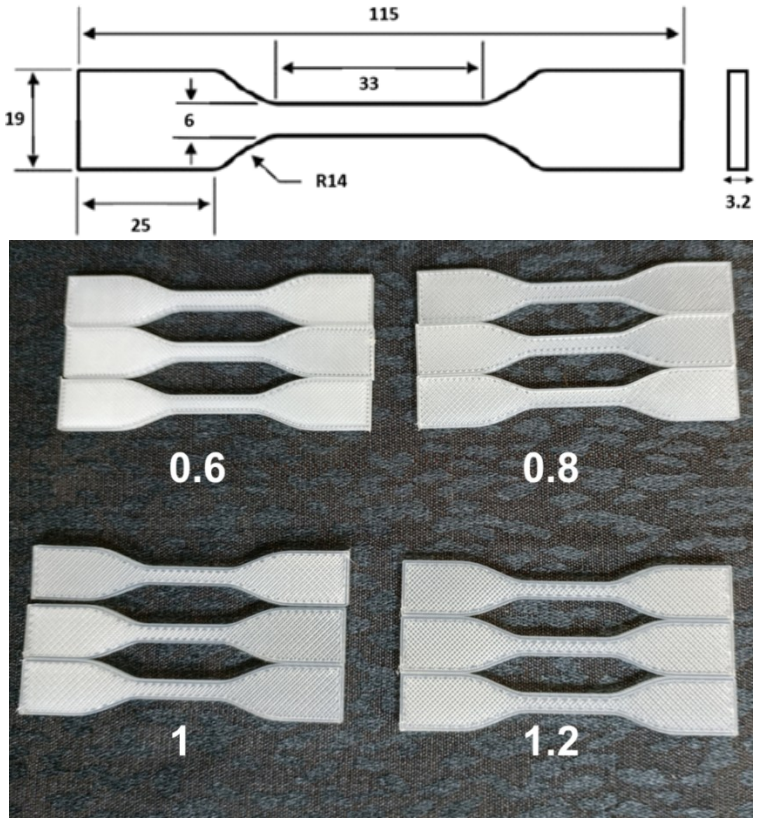


Figure 2. Schematic representation and image of tensile test specimens.

Porosity values of printed samples were determined by optical microscope (Leica, DM 2500). Samples were ground by using 80 to 800 grit sandpapers and polished by using polishing paste containing particles with a particle size of 6 µm. ImageJ which is an open access image analysis program was used for determination of porosity content. The amount of porosity measured from the investigation cross-sectional optical microscope images. The hardness of samples was measured by using Shore-D hardness tester. Specimens with dimensions of 40 mm *15 mm *5 mm (x*y*z) were printed for hardness and surface roughness measurements. Five replications were performed for hardness testing. The printing time of the process for each sample was recorded. Surface roughness of samples printed with various line-width values were measured by using surface roughness tester (Mitutoyo SJ-210). The process of surface roughness and hardness

measurements are shown in Figure 3 a and b respectively. Three different sections of specimens were measured for determination of surface roughness.

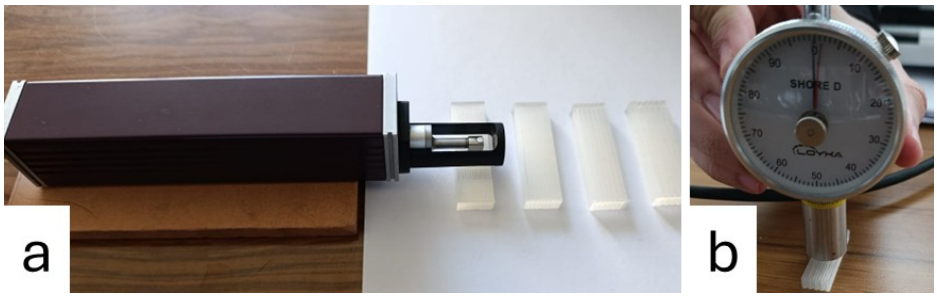


Figure 3. Images of a) surface roughness, and b) Shore-D hardness measurements.

3. Results and discussion

Thermogravimetric analysis (TGA), differential thermal analysis (DTA) and derivative thermal gravimetric (DTG) curves of PLA are shown in Figure 4. TGA curve of PLA demonstrated that the mass loss of polymer started at the temperature of 298 °C and continued up to the temperature of 397 °C. DTA curve of PLA demonstrated that endothermic and exothermic reactions occurred during heating of the polymer. The first peak located at 67 °C refers to the glass transition. Similar temperature of glass transition for PLA was reported by Chen et al. (2020) [16]. The second peak referring to a crystallization exotherm located at 107 °C. This crystallization is called cold crystallization. The small exothermic peak located at 168 °C corresponds to melt crystallization [17]. The endothermic peak located at 182 °C occurred due to the melting of polymer [18]. The sharp endothermic peak located at 372 °C refers to the decomposition of polymeric chains [19]. DTG curve exhibited single step sharp peak located at 373 °C which corresponds to the temperature of the maximum mass loss rate [20].

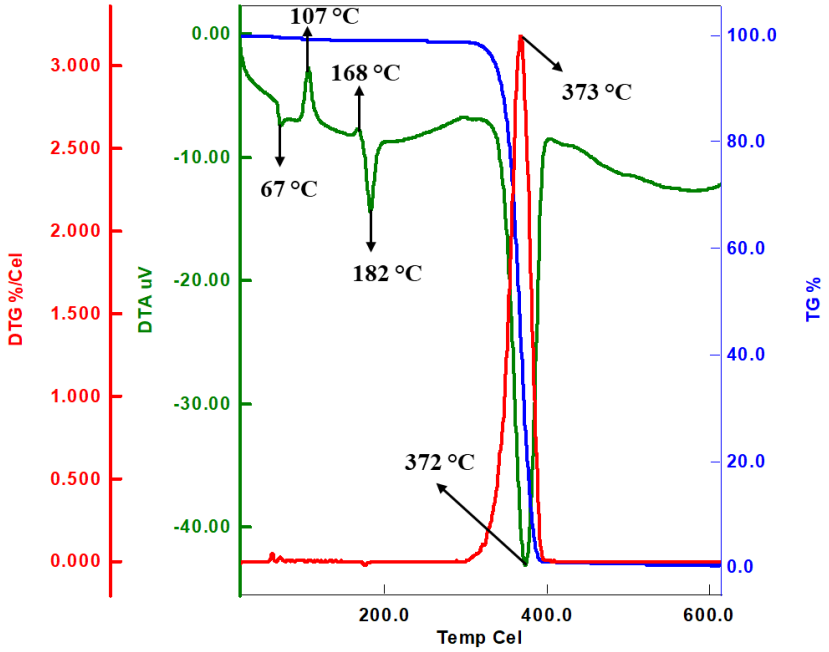


Figure 4. TGA, DTA and DTG curves of PLA filament.

Optical microscope images prepared for porosity measurement were shown in Figure 5 a-d. Porosity values of specimens 3D printed by using line-width values of 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm and 1.2 mm were determined according to areal ratio of voids by using ImageJ free access program. Porosity values were determined as 5.89%, 5.60%, 5.13% and 7.42% for specimens 3D printed with line-width values of 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm and 1.2 mm respectively. The measurements of porosity amount demonstrated that increasing line width results in decreased porosity except for the specimen printed with 1.2 mm line-width. As seen in Figure 5, the layers were deposited uniformly on each other and the gaps were formed on a linear direction, which indicates that there was no layer-shifting problem during printing. It is clearly seen that the void geometry did not change with increasing line width (except 1.2 mm), but the distance between the voids increased as expected. By increasing the line width to 1.2 mm, a change in the gap geometry was observed. It was observed that some lines were not deposited adjacent to each other and accordingly the void size increased in the Z axis, indicating poor bead to bead adhesion [21].

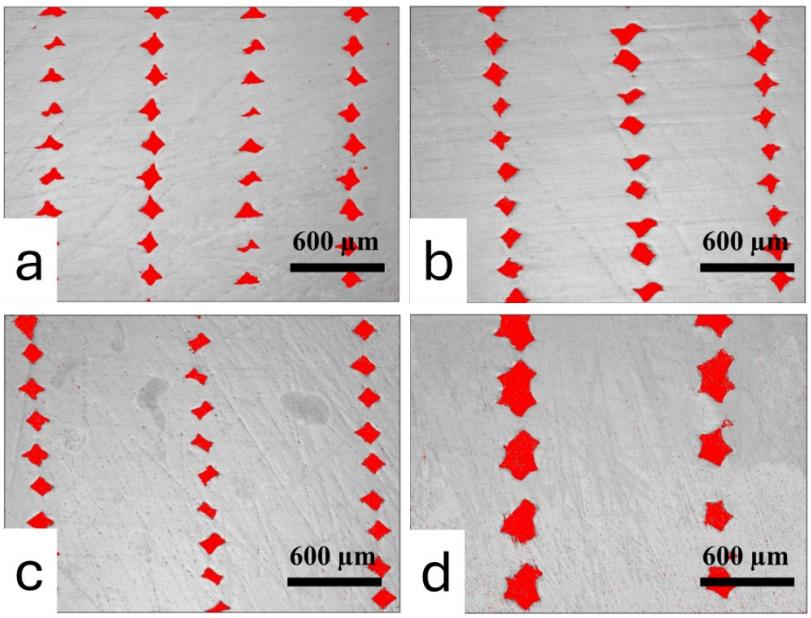


Figure 5. Optical cross-sectional images of 3D printed specimens with a line-width value of a) 0.6 mm, b) 0.8 mm, c) 1 mm and d) 1.2 mm.

The shape of the extruded line is actually cylinder and therefore the cross-sectional shape resembles a circle. An increase in the ratio of nozzle diameter to layer thickness causes the circular cross-section shape to become compressed ellipse or elongated rectangle [9]. The void was formed as a result of adjacent deposition of these lines. The cross-sectional geometry of void between these adjacently deposited lines resembled rhombus-like shape and called as inter-bead void. The mechanism of inter-bead void formation is shown in Figure 6.

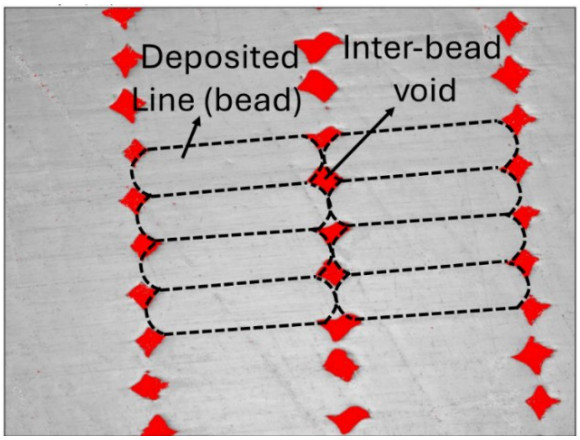


Figure 6. The mechanism of inter-bead void formation

Surface profiles of 3D printed specimens with line-width values of 0.6 mm to 1.2 mm were shown in Figure 7 a to d respectively. As it is seen from the figure that surface profile curves depicts clear 3D printing profile. Individual lines are clearly noticeable and each pit which corresponds to contact regions of adjacent deposited lines moves apart from each other with increasing line-width from 0.6 mm to 1.2 mm. Surface roughness parameters of Ra, Rq and Rz are given in Table 3. It was observed that the surface roughness increased from 5.11±0.21 µm, 6.67±0.48 µm and 36.18±4.31 µm to 9.29±1.12 µm, 13.95±1.58 µm and 66.58±9.41 µm for the parameters of Ra, Rq and Rz respectively with an increasing line-width value from 0.6 mm to 1.2 mm.

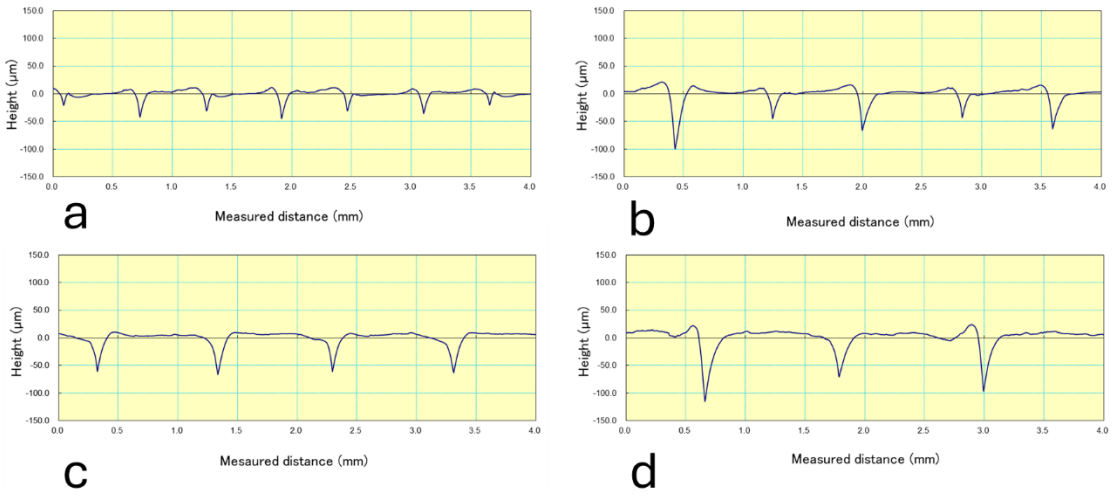


Figure 7. Surface profiles of 3D printed specimens with a line-width value of a) 0.6 mm, b) 0.8 mm, c) 1 mm and d) 1.2 mm.

Table 3. Measured surface roughness parameters of specimens

Line-width value (mm)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
0.6	5.11±0.21	6.67±0.48	36.18±4.31
0.8	7.40±0.73	11.25±1.15	59.74±5.12
1.0	7.64±1.27	12.55±2.17	65.25±10.93
1.2	9.29±1.12	13.95±1.58	66.58±9.41

Stress-strain curves of 3D printed specimens by using different line-width values are shown in Figure 8. Tensile stress has a linear relationship with strain in the elastic zone. When the applied stress is removed, the material returns to its original shape within the stress-strain range shown by the linear zone. Beyond the linear-zone, the specimen undergoes plastic deformation and returning to original shape is not possible even after the applied stress has been removed. And at the end of plastic deformation zone, rapture of the specimen occurs [22]. The highest tensile strength value of 58.52±1.93 MPa with Young's modulus of 1.53±0.29 GPa was measured for the specimen printed with the line-width value of 0.6 mm. Tensile strength of the specimens printed with various line-width values decreased to 46.54±1.18 MPa with Young's modulus of 1.17±0.23 GPa for the specimen printed with line-width value of 1.2 mm.

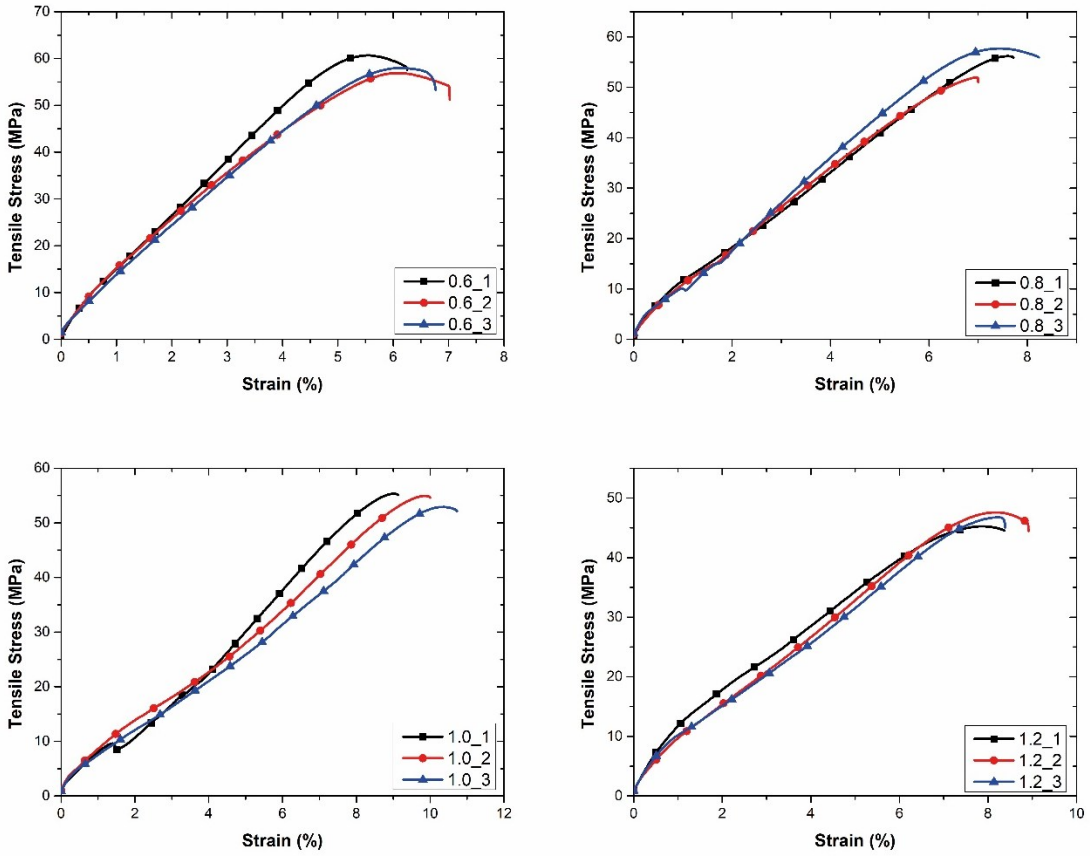


Figure 8. Stress-strain curves of 3D printed specimens by using different line-width values.

Shore-D hardness measurements results were given in Figure 9. Hardness value tended to decrease with increasing line-width value. Hardness value decreased from 44.16±4.21 to 35.80±2.95 for the parts printed using line-width values of 0.6 mm and 1 mm respectively. The hardness value increased to 41.66±3.51 for the specimen printed with line-width of 1.2 mm.

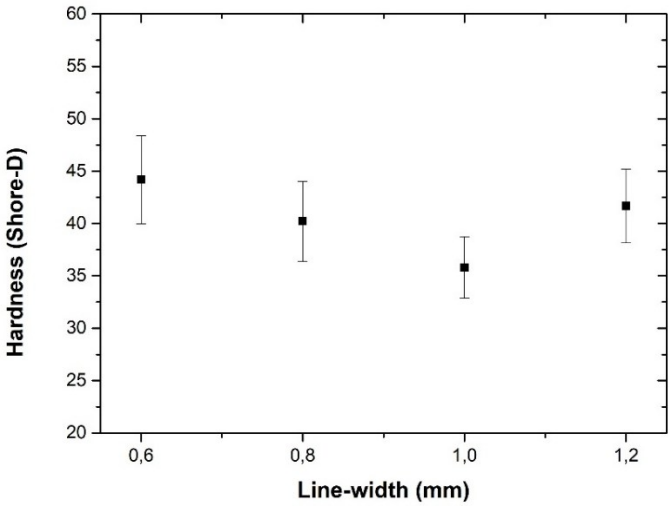


Figure 9. Effect of line-width value on the hardness.

The sliced images of specimens for line-width values of 0.6 mm and 1.2 mm are shown in Figure 10 a-d. It was observed that voids were formed between adjacent u-turns sections. The void between u-turns sections tended to become bigger when the line-width value increased from 0.6 mm to 1.2 mm. During tensile testing, these voids not only reduce the actual cross-sectional area under load but also behave as notches. Therefore, the slight diminish in tensile strength was attributed to the presence of voids between u-turn sections.

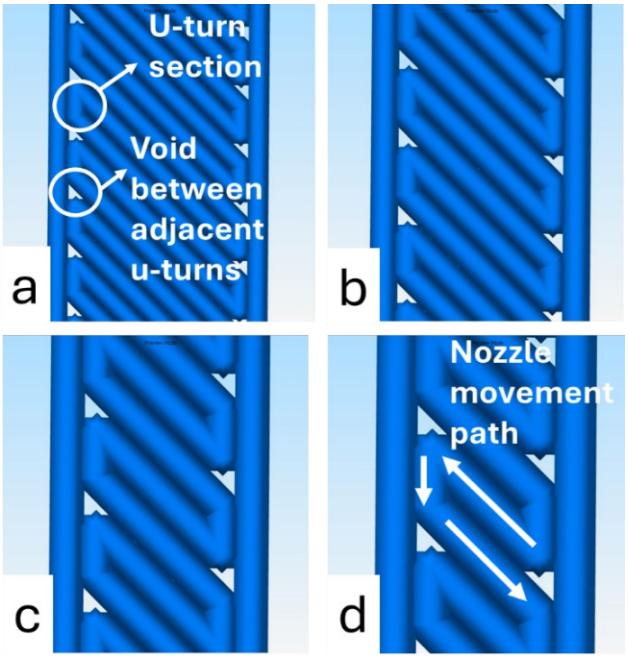


Figure 10. The sliced images of specimens for line-width values of a) 0.6 mm, b) 0.8 mm, c) 1 mm, and d) 1.2 mm

SEM images of tensile fracture surface of specimens printed with various line-width values are shown in Figure 11 a-d. SEM images of tensile fracture surface demonstrated that the main failure mechanism of the printed specimens was the rupture of deposited lines instead of fracture of inter-line bonding. It should be noted that u-turn section was clearly noticeable for the specimen printed with 1.2 mm line-width after tensile failure (see Figure 10 d).

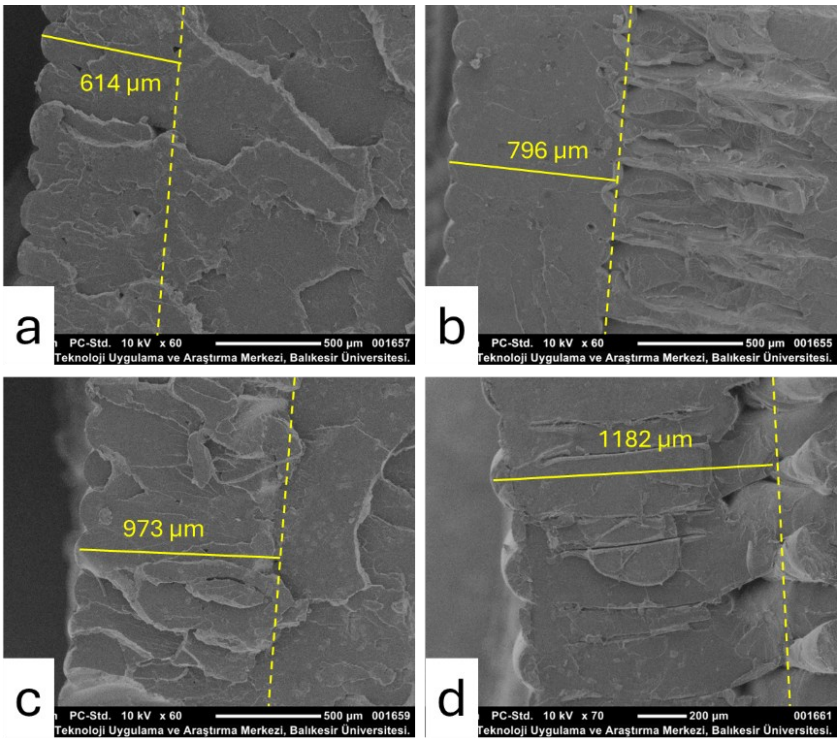


Figure 11. Tensile fracture surface of specimens printed with line-width values of a) 0.6 mm, b) 0.8 mm, c) 1.0 mm and d) 1.2 mm.

The calculated printing time for a cube with dimensions of 40 mm* 40 mm* 40 mm (x*y*z directions) with different line-width values are shown in Figure 12. As it is seen from the figure that the required time for the printing of cube decreased notably with increasing line-width. The 3D printing time for line-width of 0.6 mm was 226 min while the time for line-width of 1.2 mm was 114 min. The required printing time reduced nearly 49% with increasing line-width value from 0.6 mm to 1.2 mm. An area that would be printed with 2 pass with a line width of 0.6 mm can be printed in a single pass with a line-width of 1.2 mm. The printing time did not decrease exactly to 1/2 with the increase of line-width by 2 times. Since the time for the retraction of the filament and the time required for the nozzle to move to the printing start coordinates are also included in the printing time calculation. Therefore, printing time is not directly proportionate to line-width.

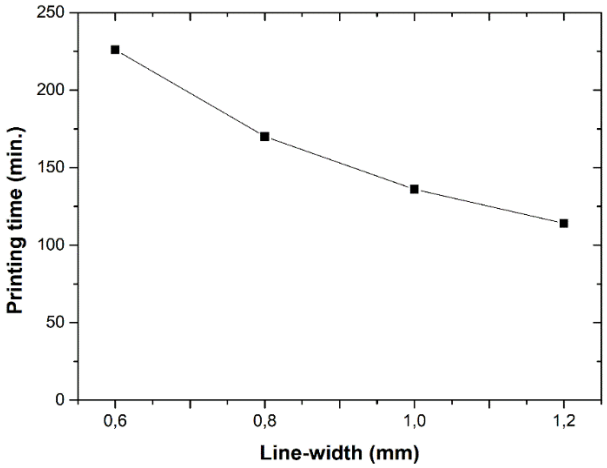


Figure 12. Line-width versus printing time curve (for the printing of 40*40*40mm cube)

4. Conclusion

In this study, the effect of line-width values on the properties of 3D printed PLA parts. 3D printing of parts such as tensile strength, surface profile and printing time. The following findings were observed:

- The void geometry did not change with increasing line width (except 1.2 mm), but the distance between the voids increased. It was observed that some lines were not deposited adjacent to each other and accordingly the void size increased in the Z axis, indicating poor bead to bead adhesion for line-width of 1.2 mm.
- Surface roughness parameter of Ra, Rq and Rz increased from 5.11±0.21 μm, 6.67±0.48 μm and 36.18±4.31 μm to 9.29±1.12 μm, 13.95±1.58 μm and 66.58±9.41 μm respectively with increasing line-width from 0.6 mm to 1.2 mm.
- The tensile strength and Young's modulus values decreased from 58.52±1.93 MPa and 1.53±0.29 GPa to 46.54±1.18 MPa and 11.17±0.23 GPa with increased line-width from 0.6 mm to 1.2 mm.
- Shore-D hardness value decreased from 44.16±4.21 to 35.80±2.95 for the parts printed using line-width values of 0.6 mm and 1 mm respectively. The hardness value increased to 41.66±3.51 for the specimen printed with line-width of 1.2 mm.
- The printing time required for the printing of a cube with a dimension of 40*40*40 mm reduced 49% with increasing line-width value from 0.6 mm to 1.2 mm.

References

[1] Türkoğlu, T., Functional grading of polymer triply periodic minimal surface structures for enhanced compressive performance and lightweight design in additive manufacturing. **Journal of Advances in Manufacturing Engineering**, 5(2), 94-102, (2024).

[2] Kim, D. B., Witherell, P., Lipman, R., & Feng, S. C., Streamlining the additive manufacturing digital spectrum: A systems approach. **Additive manufacturing**, 5, 20-30, (2015).

[3] Güler, S., Mechanical, Thermal, and Photocatalytic Properties of TiO_2/ZnO Hybrid Composites Fabricated via Additive Manufacturing. **Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering**, 5(2), 149-158, (2025).

[4] Jadhav, A., & Jadhav, V. S., A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. **Materials Today: Proceedings**, 62, 2094-2099, (2022).

[5] Kantaros, A., Soulis, E., Petrescu, F. I. T., & Ganetsos, T., Advanced composite materials utilized in FDM/FFF 3D printing manufacturing processes: the case of filled filaments. **Materials**, 16(18), 6210, (2023).

[6] Osswald, T. A., Puentes, J., & Kattinger, J., Fused filament fabrication melting model. **Additive Manufacturing**, 22, 51-59, (2018).

[7] Arockiam, A. J., Subramanian, K., Padmanabhan, R. G., Selvaraj, R., Bagal, D. K., & Rajesh, S., A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. **Materials Today: Proceedings**, 50, 2057-2064, (2022).

[8] Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núnez, P. J., Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials & Design**, 124, 143-157, (2017).

[9] Kuznetsov, V. E., Solonin, A. N., Urzhumtsev, O. D., Schilling, R., & Tavitov, A. G., Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process. **Polymers**, 10(3), 313, (2018).

[10] Molina, A., & Acosta-Sullcahuamán, J., Effect of the Process Parameters on the Mechanical Properties of 3D-Printed Specimens Fabricated by Material Extrusion 3D Printing. **Engineering Proceedings**, 83(1), 1, (2025).

[11] Bhosale, V., Gaikwad, P., Dhere, S., Sutar, C., & Raykar, S. J., Analysis of process parameters of 3D printing for surface finish, printing time and tensile strength. **Materials Today: Proceedings**, 59, 841-846, (2022).

[12] Mulcahy, N., O'Sullivan, K. J., O'Sullivan, A., & O'Sullivan, L., Preliminary assessment on the effects of line width, layer height and orientation on strength and print time for FDM printing of total contact casts for the treatment of diabetic foot ulcers. **Annals of 3D Printed Medicine**, 11, 100115, (2023).

[13] Kim, M. K., Lee, I. H., & Kim, H. C., Effect of fabrication parameters on surface roughness of FDM parts. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 19, 137-142, (2018).

[14] Butt, J., Bhaskar, R., & Mohaghegh, V., Analysing the effects of layer heights and line widths on FFF-printed thermoplastics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 121(11), 7383-7411, (2022).

[15] John, P., Komma, V. R., & Bhore, S. P., Development of MATLAB code for tool path data extraction from the G code of the fused filament fabrication (FFF) parts. **Engineering Research Express**, 5(2), 025018, (2023).

[16] Chen, J. M., Tseng, Y. Y., Lee, D., Lin, Y. T., Lin, S. H., Lee, T. Y., ... & Ito, H., A robust experimental model to explore the three-dimensional printing of polylactide parts: Solution versus melt extrusion. **Applied Sciences**, 10(2), 509, (2020).

[17] Suryanegara, L., Nakagaito, A. N., & Yano, H., The effect of crystallization of PLA on the thermal and mechanical properties of microfibrillated cellulose-reinforced PLA composites. **Composites Science and Technology**, 69(7-8), 1187-1192, (2009).

[18] Mysiukiewicz, O., & Barczewski, M., Crystallization of polylactide-based green composites filled with oil-rich waste fillers. **Journal of Polymer Research**, 27, 1-17, (2020).

[19] Shuhua, W., Qiaoli, X., Fen, L., Jinming, D., Husheng, J., & Bingshe, X., Preparation and properties of cellulose-based carbon microsphere/poly (lactic acid) composites. **Journal of Composite Materials**, 48(11), 1297-1302, (2014).

[20] Agustin, M. B., Nakatsubo, F., & Yano, H., The thermal stability of nanocellulose and its acetates with different degree of polymerization. **Cellulose**, 23, 451-464, (2016).

[21] Nasirov, A., Gupta, A., Hasanov, S., & Fidan, I., Three-scale asymptotic homogenization of short fiber reinforced additively manufactured polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, 202, 108269, (2020).

[22] Alharbi, M., Kong, I., & Patel, V. I., Simulation of uniaxial stress–strain response of 3D-printed polylactic acid by nonlinear finite element analysis. **Applied Adhesion Science**, 8, 1-10, (2020).

DOI:10.25092/baunfbed. 1597804 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 639-653, (2025)*

Yapay zeka teknolojisi ile tüp bebek tedavisinde fiziksel özellik seçimine yönelik bir yazılım ve cihazı geliştirilmesi

Tuçe KUREŞ[1*], Aydın ŞIK[1]

Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Ankara

Geliş Tarihi (Received Date): 07.12.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 02.05.2025

Öz

İnsanoğlunun varlığı ve devamı için doğum olayı gereklidir. Doğum olayında istenen ve olması gereken bireylerin öncelikle sağlıklı bireyler meydana getirmesidir. Günümüzde doğurganlığı sağlıklı olan bireyler bebeklerin cinsiyetlerini seçmek isteyebilirken, çocuğu olmayan bireyler tüp bebek tedavisine ihtiyaç duyabilirler. Bununla birlikte Endüstri 4.0 teknolojilerinden biri olan yapay zeka teknolojisi bu alanda tüp bebek tedavisine yardımcı olabilecek teknolojilerden biri olabilir. Yapay zeka teknolojisi, tıptan turizme, turizmden bankacılığa birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada yapay zeka teknolojisinin tüp bebek tedavisine uyarlanıp uyarlanamayacağı çalışılmıştır. Halihazırda tüp bebek tedavisi gören bireyler bebeklerin cinsiyetlerini seçebilirlerken, bir sonraki aşamada bebek özellikleri seçilmesinin mümkünlüğü tartışılmaktadır. Örneğin belli başlı bebek özelliklerini sayacak olursak; cinsiyet, göz rengi, saç rengi, saç tipi, burun büyüklüğü, ten rengi, boy uzunluğu, el kol uzunluğu, yüz yapısı, vücut tipi. Bu özelliklerin seçilebilecek olduğunu varsayarak, bu makalede sunulmak üzere yapay zeka teknolojisini kullanarak Java Eclipste bir hastane programı hazırlanmış olup; yumurta ve spermin birleştirilmesi için Solidworks'te bir donör makinası tasarlanmıştır. Bu programla birlikte, hastalar bebek özelliklerini seçebilecek, seçilen özellikler için istenirse yumurta bankası ve sperm bankasından alınan hücreler donör makinasında birleştirilerek veya hastalar kendi yumurta ve spermlerini kullanabileceklerdir.

Anahtar Kelimeler: *Yapay zeka teknolojisi, tüp bebek tedavisi, endüstriyel tasarım*

[*]Tuçe KUREŞ, tuce.kures@gazi.edu.tr, http://orcid.org/0009-0003-0205-6112
Aydın ŞIK, aydıns@gazi.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-8977-9094

Development of a software and device for physical feature selection in vitro fertilization treatment with artificial intelligence technology

Abstract

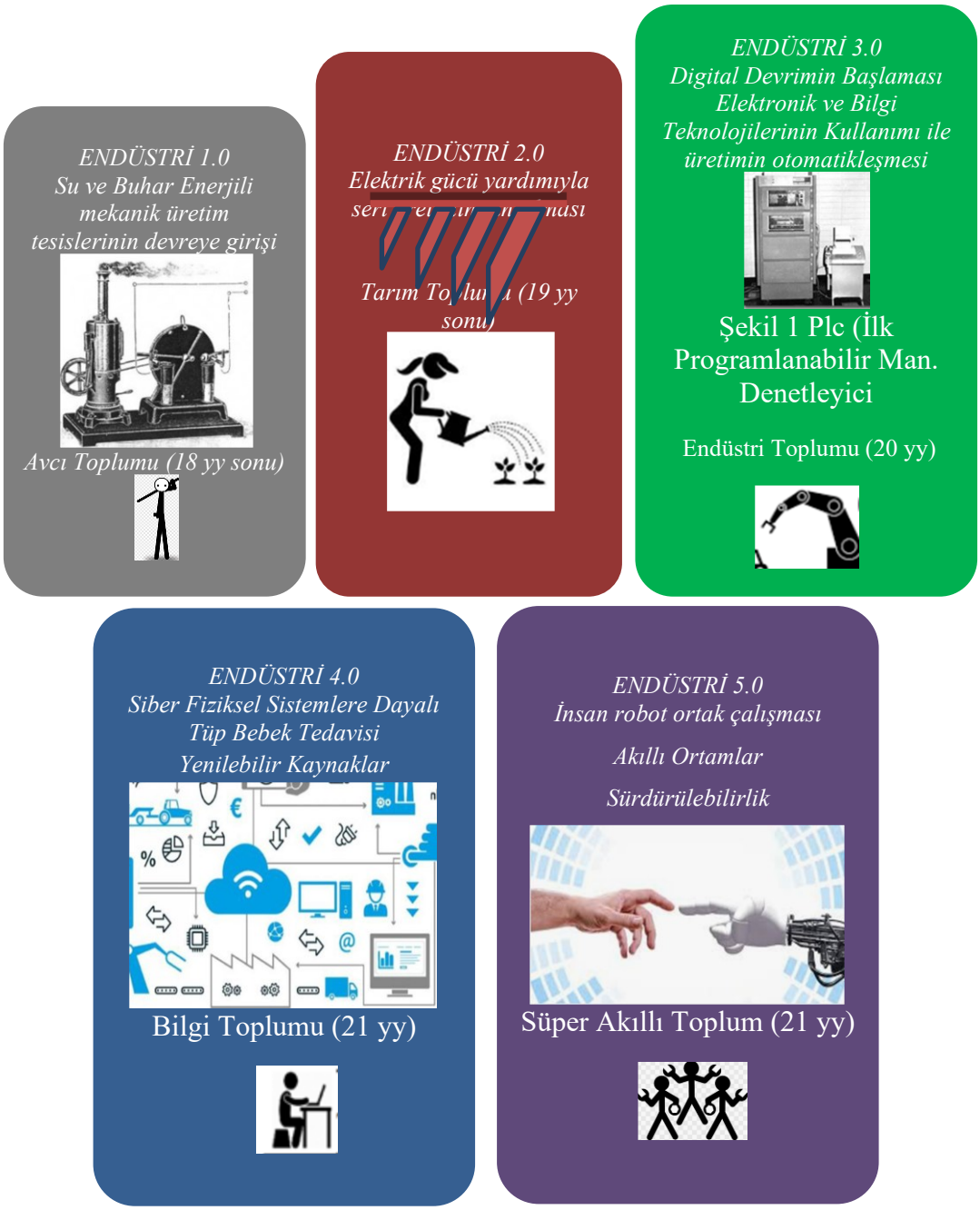
Birth is necessary for the existence and continuation of human beings. What is wanted and needed in the birth event is that the individuals should first be healthy individuals. Nowadays, individuals with healthy fertility may want to choose the gender of their babies, while individuals who cannot have children may need in vitro fertilization treatment However, artificial intelligence technology, one of the Industry 4.0 technologies, may be one of the technologies that can help in vitro fertilization treatment in this field. In this study, it was studied whether artificial intelligence technology can be adapted to in vitro fertilization treatment. While individuals currently undergoing IVF treatment can choose the gender of their babies, the possibility of choosing the baby's characteristics in the next stage is being discussed. Assuming that these features can be selected, a hospital program has been prepared in Java Eclipse using artificial intelligence technology to be presented in this publication; a donor machine has been designed in Solidworks to combine eggs and sperms. With this program, patients will be able to choose the baby's characteristics, and if desired, cells taken from the egg bank and sperm bank can be combined in the donor machine for the selected characteristics, or patients will be able to use their own eggs and sperm.

Keywords: *Artificial intelligence technology, in vitro fertilization treatment, industrial design*

1. Giriş

Günümüzde Endüstri 5.0 teknolojilerinden biri olan yapay zeka teknolojisi, hemen hemen her alanda kendini göstermiş ve gelişim sağlamıştır. İlkel toplumlar su ve buharla enerji üretirken teknoloji giderek gelişmiş ve günümüzde artık akıllı ortamlar ile Endüstri 5.0'a geçiş başlamıştır.

Yapılması planlanan çalışmada tüp bebek tedavisi ile yapay zeka teknolojisi birleştirilecektir. Tüp bebek tedavisi öncelikle çocuk sahibi olamayan bireylerin çocuklarının olmasını sağlarken, aynı zamanda çiftlerin sağlıklı çocuklar doğurmalarına da vesile olmaktadır. İlgili tedavide uygun yumurta ve spermler birleştirilip rahme yerleştirilir.



Şekil 1. Endüstrileşme Evrimi

2. Yapay zeka teknolojisi

Yapay zekânın temel amacı insanlığın kendini geliştirmesi için değerlendirme ve anlama kabiliyetini eyleme bağlamak amacıyla dil işlevlerini arttırmaktır. Ancak hiçbir çalışma alanı bu konuları tam olarak içermemekteydi. Bilgisayar bilimi de daha gelişmemişti. Yapay zekâ; büyük fikirlerinin gelişiminden kaynaklanan beklentilerden, büyük zorluklarla yüzleşmeye; daha çok endüstriyel uygulamanın geliştirilmesine ve artık bu alanın bir bilim haline gelmesi gerçeğine kadar gelişmiştir. Önceki zamanlardan günümüze kadar, insan bilgilerinin keşfi kadar fazla olmasa da yapay zekâ alanındaki bilgi artışı, insanlığı yeni bilinmeyen alanlarda daha fazla sonuç yaratmak için motive etmeye itmiştir. Böylece ciddi derecede kısıtlı zaman döngüsü içinde öngörülmesi

imkânsız zorluklar aşılmıştır. Çevreden faydalanan tasarımcılar, doğadan esinlenen optimizasyon çalışmalarıyla günümüzdeki algılayan ve görmeyi öğrenen beyinli bilgisayarlara ulaşmışlardır.

Yapay zekâ, bir bilgisayarın ya da bilgisayar destekli bir makinenin, genellikle insana özgü nitelikler, çözüm yolu bulma, anlama, bir mana çıkarma, genelleme ve geçmişteki deneyimlerinden öğrenme gibi yüksek mantık süreçlerine ilişkin görevleri yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmıştır. Yapay zekâyı oluşturan yapay sinir ağları insan beynini taklit eden ve insan beyni gibi öğrenen bir sistemin varlığını temsil eder. Yapay sinir ağı modellerinin genel olarak dört gruptan oluşmaktadır [1].

Tek Katmanlı Algılayıcılar: Tek katmanlı algılayıcılar girdi ve çıktı sistemlerinden oluşur.

Çok Katmanlı Algılayıcılar: Birçok nöronun belli bir üstünlük içerisinde bağlandığı yapıya çok katmanlı algılayıcılar denir. Bu katmanlar girdi katmanı, ara katman, çıktı katmanı olarak sıralanabilir.

İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları: Bu ağda nöronlar girişten çıkışa doğru düzenli katmanlar şeklindedir. Girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı olarak sıralı şekilde bilgiler hücrelere iletilir.

Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağları: Bu ağda nöronlar sadece kendinden sonra gelen nöron katmanına girdi olarak verilmez. Kendinden önceki katmanda veya kendi katmanında bulunan herhangi bir nörona girdi olarak bağlanabilir .

Yapay sinir ağları her geçen gün gelişen teknolojiler ile birlikte hayatımıza girmeye başlamış ve var olan teknolojilerde gelişim göstermiştir.

2.1. Yapay zekâ teknolojisinin kullanıldığı alanlar

Yapay zekâ sistemleri aşağıdaki ana meslek dallarında gelişim göstermiş olup, insanlara çalışmaları ve işleri konusunda yardımcı olmaya devam etmektedir.

1. Tarım Alanındaki Değişim
2. Sağlık Alanındaki Değişim
3. Hukuk Alanındaki Değişim
4. Eğitim Alanındaki Değişim
5. Savunma Sanayi Alanındaki Değişim
6. Endüstri Alanındaki Değişim
7. Turizm Alanındaki Değişim
8. Muhasebe Alanındaki Değişim
9. Bankacılık ve Finans Alanındaki Değişim
10. Siber Güvenlik Alanındaki Değişim

2.1.1. Tarım alanındaki değişim

Yapay zekânın tarım alanındaki değişimi, ülkemizin geleceği açısından oldukça fazla bir öneme sahiptir. Yapay zekâ, mahsul verimini ve ürün parametrelerini tahmin etmekte normalden %20'ye yakın daha net sonuçlar vermektedir [2]. Bitki hastalıkları tahmininde ve ilaç tedavilerinin seçilmesinde kullanılmaktadır. Günlük hava durumu tahminiyle birlikte (yağış miktarı, düşük ve yüksek sıcaklıklar vb.) uygun ürün yerleştirme sonuçlarına ulaşılmaktadır. Tarım ürünlerinin yabancı otlardan ayrılmasında, yumurtaların sınıflandırılmasında yapay zekâ modelleri kullanılmaktadır.

Ayrıca tohumların çiçeklenmesinde ve fizyolojik olgunlaşması tarihlerinin belirlenmesinde yapay zekâ modellerinden yararlanılmaktadır.

2.1.2. Sağlık alanındaki değişim

Yapay zekânın sağlık amaçlı kullanımı, birçok hastalığın önceden tahmin edilmesinde, hastalık tanısı koyulmasında öncelikli olarak kendini gösterirken, hastaya giydirilen mobil cihazlar sayesinde hastanın doktor tarafından takibi sağlanabilmektedir. Yapay zeka destekli robotik ameliyatlar, insansı hataların en aza indirilmesini sağlamaktadır. Hastaların ilaçlarını doğru yerde, doğru zamanda alması özellikle Alzheimer gibi kronik hastalıklarda oldukça önemlidir. Yapay zekâlı sistemler sayesinde, hasta ilaç takibi yapılabilmektedir.

Hastaneler için; acil hasta bakımı yönetiminde, e-nabız gibi uygulamalarla hasta planlaması ve randevu sisteminde kullanılmaktadır. Ayrıca sağlık hizmetlerinin maruz kalabileceği sorunları tahmin eden yapay zekâ uygulamaları mevcuttur [3].

2.1.3. Hukuk alanındaki değişim

Yapay zekânın hukuk alanında kullanılması; avukatların mevzuatları bilme ve takip etmesinde, dosya tutma ve belgeleri dosyalama yükümlülüklerini kapsar. Sözleşmelerde yer alan kilit sorunların ve bilgilerin otomatik tespitinin yapılması, hukuki metinlerden bilgilerin otomatik olarak takip edilmesi zamandan tasarrufu sağlarken, hatayı minimuma indirmiş olur. Tahmin teknolojisi ile dava sonuçlarının öngörülmesi, bürokratik belge süreçlerinin hızlandırılması, tescilli ürünler ve ticari markalar araştırmasının çok kısa sürede yapılması yapay zekâ kazanımlarındandır. Ayrıca trafik düzeninin sağlanması, kamera izleme ve yüz tanıma yöntemleriyle suçun önceden öngörülmesi (insanların jest ve mimiklerinden, duruşlarından) suçun işlendiği olay yerinin modellenmesi deliller ortadan kalktığında bile inceleme fırsatı verir. Delillerin toplanması, yasa değişikliklerinin takibi, vicdani delil sistemi ile hâkim kararlarına yardım edilmesi yapay zekâ uygulamalarının birer sonucudur. [4].

2.1.4. Eğitim alanındaki değişim

Eğitimde yapay zeka uygulamalarına; çoktan seçmeli testler, test sonuçlarını hemen gösteren sistemler, uygulamalarla eğitim, uzaktan ve online eğitim çalışmaları gösterilebilir. Google Scholar, Jstor gibi uygulamalarla, uygulamalı araştırma geliştirilmiş olup ayrıca eğitimcilerin bilgilerini ve öğrencilerin deneyimlerini kullanarak geliştirilen sistemler mevcuttur. Yapay zeka insan zekasını taklit ederek, problem çözmeye çalışırken; uzman sistemler belli bir konuda uzmanlaşmış kişilerin çözebileceği sorunlara odaklanırlar [5]. Ayrıca yapay zeka, hedef kitle, öğrenme alanı gibi farklı alanlarda gelişimini sürdürmektedir.

2.1.5. Savunma sanayi alanındaki değişim

Yapay zekâlı sistemler ile birlikte; ses tanıma, görüntü yakalama, dudak okuma gibi uygulamalar geliştirilmiştir. Nükleer silahların etkileri, nükleer stokların miktarları yapay zekâ ile hesaplanmaya başlanmıştır. Savaş sırasında oluşabilecek düşmanla temas senaryolarının kurgulanmasında yapay zekâlı sistemlerden yararlanılmaktadır. Yapay zeka, deniz silah sistemine entegre edildiği takdirde büyük kararları çok hızlı şekilde verebilme özelliğine sahiptir. Yapay zekâ; insansız araçlar, silah sistemleri, uçaklar, gemiler, denizaltılar gibi savaşan unsurları birbirine bağlayarak tek bilgi sistemi

oluşturabilir. Ayrıca bugün istihbaratçıların karşılaştığı en büyük sorunlardan biri, çok fazla bilgi içinden doğru bilgiyi seçebilmektir. Bu yüzden farklı bilgiler yapay zekâ ile birleştirilip analiz edilebilmektedir. [6].

2.1.6. Endüstri alanındaki değişim

Yapay zekâlı sistemler ile birlikte, akıllı fabrikalar düzgün ve eşzamanlı şekilde kontrol edilebilir ve üretim süreci otomatik olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Elektronik denetim sistemleri, karar verme, süreç planlama, fiber-optik kablo döşeme, devre tasarımı, optimizasyon, tren frenleme, karmaşık elektronik ve elektromekanik sistemlerin tamiri ve tasarımı, dizel ve elektrikli hareket eden sistemlerin tamiri ve tasarımı, bilgisayar ve iletişim sistemlerinin tasarımı ve hataların bulunması, çeşitli kontrol sistemleri, ev temizlik robotları, telekomünikasyon alanında sinir ağı uygulaması, elektronik alanda kullanım, imalatta ürün tasarımı, proses ve makinelerin bakımı, kimyasal proseslerin dinamik modellenmesi, elektronik yonga hata izleri, optimizasyon çalışmaları kullanım alanlarına örnek olarak gösterilebilir. [7-8].

2.1.7. Turizm alanındaki değişim

Turizm sektöründe yapay zekâ, karar verme sürecinde karmaşıklığın giderilmesinde ve karar verme sürecinin hızlanmasında kullanılmaktadır. Satın almada karar verme desteği, ödeme sistemleri, seyahat danışmanlığı gibi hizmetler yapay zekâlı sistemler tarafından gerçekleştirilerek insanların işini kolaylaştırmaktadır. Müşterilerle iletişimde, müşteri ihtiyaçlarının belirlenmesinde ve müşteri verilerinden faydalanılması konusunda yapay zekalı sistemler kullanılmaktadır. Müşterilerin ihtiyaçlarını giderecek sohbet odaları, yapay zekalı müşteri asistanları, reklam ve tanıtım yapan robotlar turizm alanında kullanılan hizmetlere örnek gösterilebilir. Ayrıca robotik resepsiyon görevlileri, bagaj taşıyıcılar, bagaj muhafaza robotları insanlara seyahat ihtiyaçları konusunda destek olmaktadır. Seyahat robotları, turistlere kendi seyahat rehberlerini oluşturmada yardımcı olmaktadır [9].

2.1.8. Muhasebe alanındaki değişim

Yapay zekânın muhasebesel alandaki değişmesine, elle defter tutulan dönemden günümüz teknolojilerin kullanılması öncelikli olarak örnek gösterilebilir. Muhasebe bir bilgi üretme sistemidir. Bu nedenle doğru zamanlı ve anlaşılabilir bilgilerin üretilmesi muhasebesel kullanıcılar açısından oldukça önemlidir. Yapay zekâlı sistemler ile insan gücü azaltılmış, zamandan tasarruf sağlanmıştır. Bu durumun en çarpıcı örneği, hesap makineleridir.

Muhasebesel kayıtların bilgisayarlara aktarılmış olması, e-defter e-fatura ve benzeri uygulamalar vergi denetimini giderek etkin hale getirmiştir. Gelecekte özellikle, şirket değerlemesi, türev ürünler, riskten korunma muhasebesi konuları iş hayatının çok önemli konuları haline gelecek, verilecek danışmanlık faaliyetlerinin kapsamında yer alacaktır [10-11].

2.1.9. Bankacılık ve finans sektöründeki değişim

Bankalar, internet uygulaması ve mobil bankacılık uygulamalarını rekabet amacıyla kullanmaktadırlar. Dolayısıyla şubelerden yapılan tüm işlemler hemen hemen mobil bankacılık aracılığıyla yapılabilmektedir. İnternet bankacılığı ile yapılacak işlemler arasında hesap bakiyesi ve işlem özeti izleme, para transferi ve ödemeler, havale, müşterinin kendi hesaplarındaki transferler, EFT, kredi kartı hesap özeti, kredi kartı

ekstreleri, yatırım işlemleri, repo işlemleri, devlet tahvili ve hisse senedi işlemleri, dekont alma ve talimat işlemleri, fatura ödeme işlemleri, otomatik ödeme talimatı işlemleri, kredi izleme, maaş avans kullanma, hesap açma ve hesap kapama, sanal kart tanımlama yapılabilecek işlemler arasındadır. Ayrıca mobil uygulamalarda ödeme yapabilme imkânı, bir karta ihtiyaç olmadan kullanılabilirlik avantajı sunar. Giyilebilir teknoloji olan akıllı saat, akıllı şort ve akıllı bileklikler taksilerde, benzinliklerde, restaurant ve kafe gibi yerlerde kullanılabilir [12].

2.1.10. Siber güvenlik alanındaki değişim

Yapay zekanın siber güvenlikte kullanılması ile sisteme herhangi bir saldırı olma ihtimalinde bunun önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Aslında yapay zekâ, siber suçları sisteme sızmadan önce tahmin edebilir. Bilgisayar yapay zekâ açısından avantajlıdır, çünkü bilgisayara verileri öğretmek kolaydır. Makine öğrenmesi ile her türlü saldırı, bilgisayar korsanlığı, veri hırsızlığı tahmin edilebilir. Yapay zekâ ile çevrili bir bilgisayar, tehditleri kötü amaçlı yazılımları ayırt etme ve bunları önleme yeteneğine sahiptir. Ayrıca siber güvenlikteki örneklere biyometrik kimlik doğrulama (iris tanıma, parmak izi tanıma, yüz tanıma) örnek gösterilebilir. Böylece kişinin gerçek mi yoksa sahte mi olduğu anlaşılabilir. Siber güvenlik uzmanları, sistemlere giren yetkisiz kişileri tespit edebilmek için tüm verileri yoğun bir şekilde toplamaya ve bu veriler üzerinde makine öğrenmesi yöntemlerini kullanmaya çalışır [13].

3. Yapay zekâ teknolojisinin tüp bebek tedavisinde kullanılması

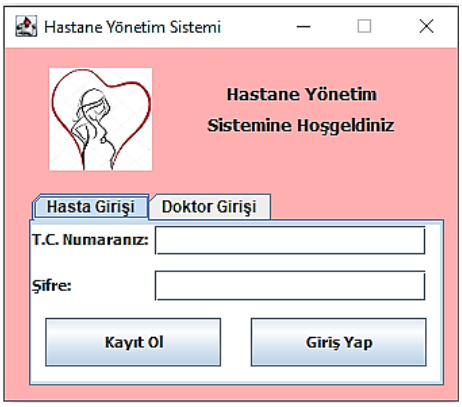
3.1. Java eclipse ile hastane programının oluşturulması ve donör makinasının incelenmesi

Bu uygulamada HeidiSQL ve Java Eclipse programı ile birlikte bir hastane otomasyonu oluşturulmuştur. Öncelikle hastalar uygulamaya kayıt olabilecekler ve kayıt olan hastalar istedikleri bebek özelliklerini seçebileceklerdir. Daha sonra bu hastalar doktorların ekranına düşecek ve doktorlar hastaların istediği bebek özelliklerini programa girerek ilgili donör makinasında döllenmeyi gerçekleştirebileceklerdir. Bu döllenme yumurta ve sperm bankasından olabileceği gibi kişilerin kendi DNA özelliklerinin de kullanılabileceği bir ortam oluşturmaktadır. Öncelikle Java Eclipste oluşturulan bu programın nasıl kullanılacağından bahsedilecektir. Bu program arka planda HeidiSQL programı ile birlikte çalışır ve verileri kaydeder. HeidiSQL'de yapılan güncellemeler uygulamadaki tablolara, uygulamada yapılan güncellemeler HeidiSQL'deki verilere yansırlar.

Bu uygulamada seçilmek üzere 10 özellik öngörülmüştür. Bu özellikler cinsiyet, göz rengi, saç rengi, saç tipi, burun büyüklüğü, ten rengi, boy uzunluğu, el kol uzunluğu, yüz yapısı ve vücut tipi olarak belirlenmiştir. Bu özellikler ebeveynler tarafından seçildikten sonra, doktor onayına sunulur ve daha sonra donör makinasında döllenme işleminin yapılması öngörülür.

3.1.1. Java eclipse ile oluşturulmuş bir hastane otomasyonu

Hastaların bebek özelliklerini seçebilmeleri için öncelikle uygulamaya kayıt olmaları gerekmektedir. Hastane yönetim sistemi açıldığında karşımıza iki sekmeli bir pencere çıkar. İlk sekmesi hasta girişi, ikinci sekmesi ise doktor girişidir. Öncelikle hasta giriş sayfasından kayıt ol butonuna tıklanarak hasta kayıt ekranı açılır.

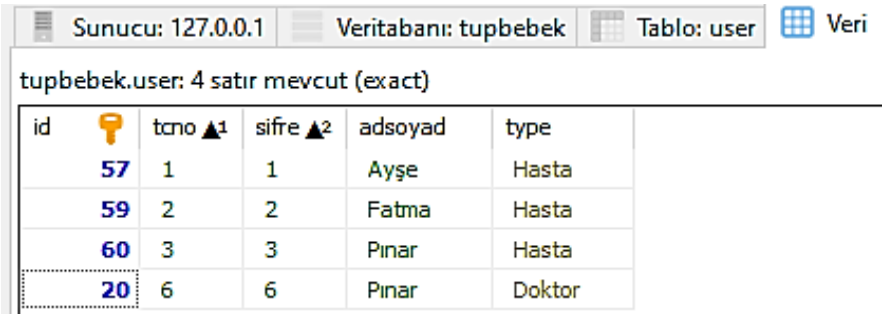


Şekil 2. Hasta-doktor giriş ekranı

Şekil 3. Hasta kayıt ekranı

Hasta kayıt ekranına Ad-Soyad veya eş isimleri ile birlikte, çiftlerden birinin T.C. Numarası ve şifre yazılarak kayıt olunur (Şekil 3).

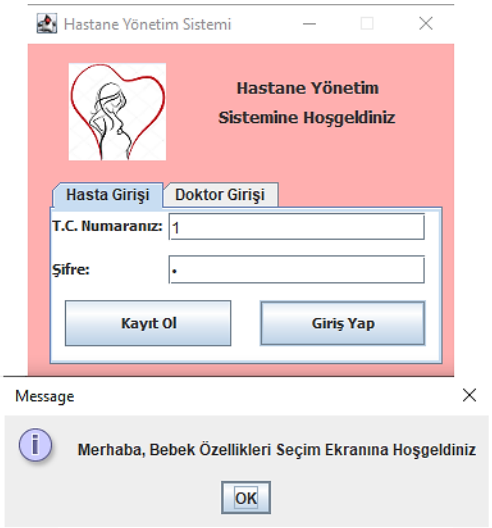
Bu ekrandan "Geri Dön'e" tıklandığında, "Hasta-doktor giriş ekranına (Şekil 2)" geri dönülür. Kayıt olunan bu bilgiler arka planda HeidiSQL'de güncellenerek veri kayıtlarını tutar.



id	tcno	sifre	adsoyad	type
57	1	1	Ayşe	Hasta
59	2	2	Fatma	Hasta
60	3	3	Pınar	Hasta
20	6	6	Pınar	Doktor

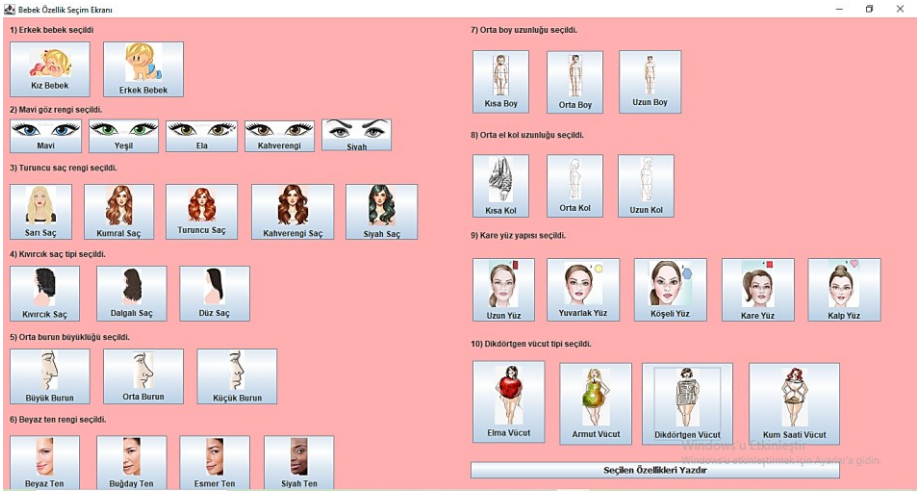
Şekil 4. HeidiSQL kullanıcı-hasta tablosu

HeidiSQL'de kayıtlı olan hastalar ve doktorlar bir tabloda sergilenir. (Şekil 4) Tüp bebek adı altında hem kullanıcılar hem de bebek özelliklerinin kayıtlı olduğu bir tablo bulunmaktadır.



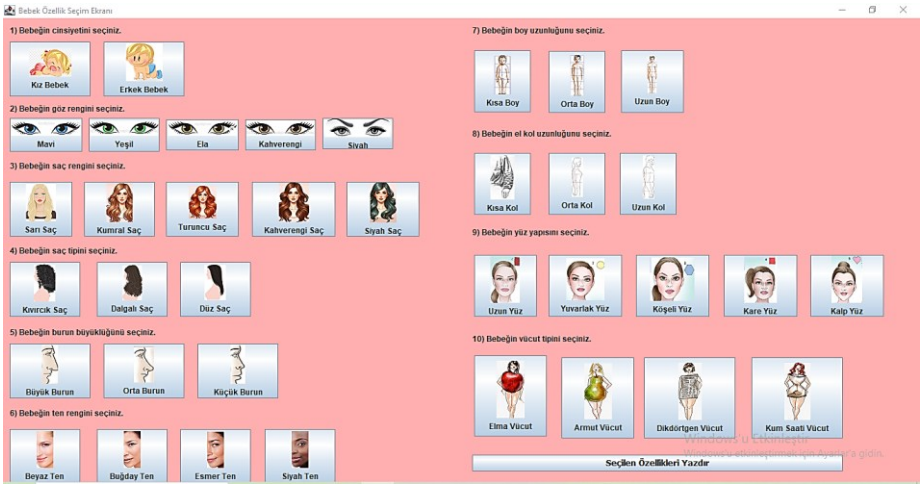
Şekil 5. Hasta giriş ekranı

Hasta giriş ekranında (Şekil 5) kullanıcılar T.C. Numaraları ve şifreleriyle uygulamaya giriş yaparlar. Buradan bebek özellik seçim ekranı (Şekil 6) açılır. Ancak öncesinde uygulama kullanıcıdan kendisine ait ad soyad bilgisini girmesini ister. Bebek özellik seçim ekranı'nda (Şekil 6) bebeklere ait 10 özellik bulunur. Bu özellik ebeveynlerin seçmesi için butonlar halinde dizayn edilmiştir.



Şekil 6. Bebek özellik seçim ekranı

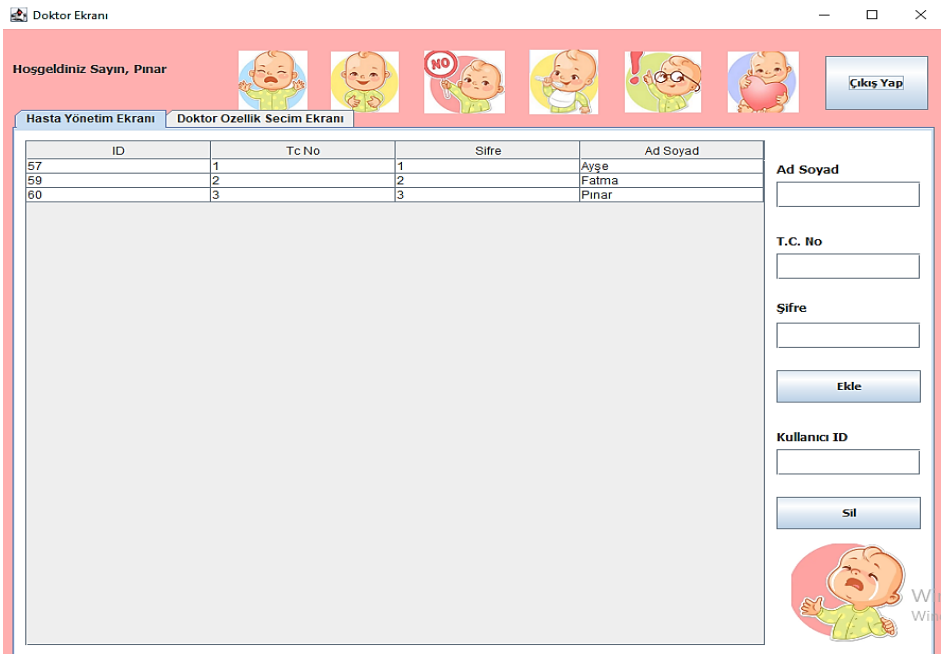
Şekil 7'de bebek özellikleri seçildikten sonra, soru cümleleri; seçilen özelliklere göre değişir ve bu uygulamadan çıktı alınır. Sonrasında ilgili veriler doktora teslim edilir.



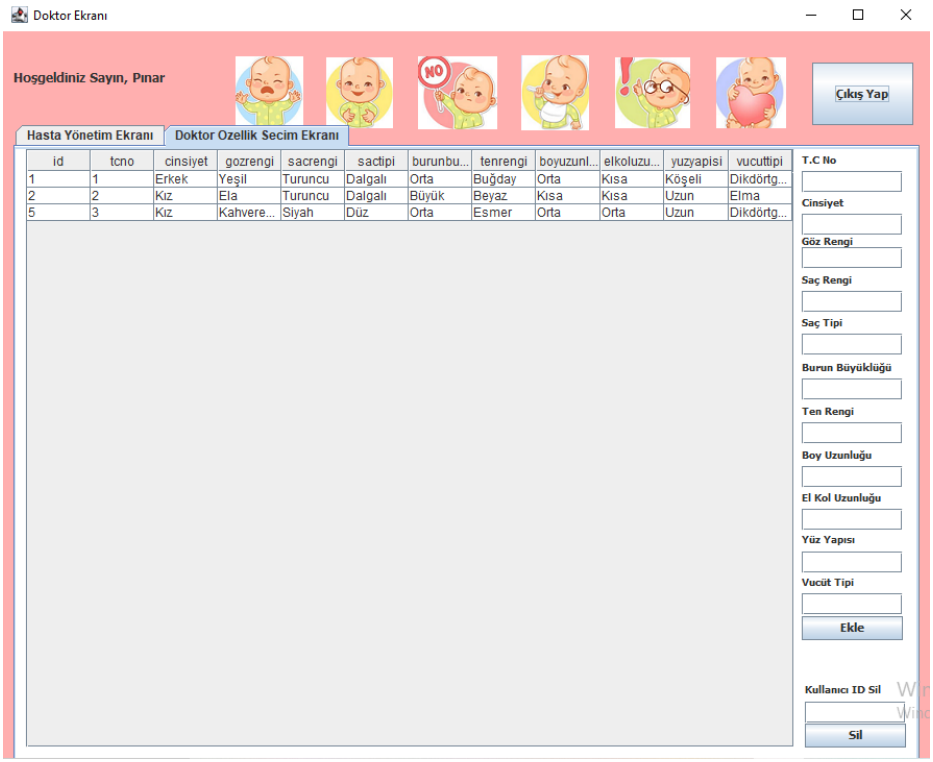
Şekil 7. Bebek özellik seçim ekranı 2

Şekil 8'de Hasta yönetim ekranı görünmektedir. Bu ekrandan kayıtlı doktorlar kendi T.C Numaraları ve şifreleri ile uygulamalarına giriş yaparlar ve randevusu oluşturulan hastaları görebilirler.

Şekil 9'da doktor özellik seçim ekranı karşımıza çıkmaktadır. Bu ekranda, doktorların; hastalarının seçmiş olduğu bebek özelliklerini kaydetmeleri varsayılır. Bu ekrana kaydedilen bilgiler, doktorlar tarafından değiştirilebilir ve tedavi sonrasında silinebilirler. Böylelikle Java Eclipse ve HeidiSQL altyapısı ile kullanılan programda bir kullanıcı ve doktor örneği incelenmiş olup, programın detayları anlatılmıştır.



Şekil 8. Hasta yönetim ekranı



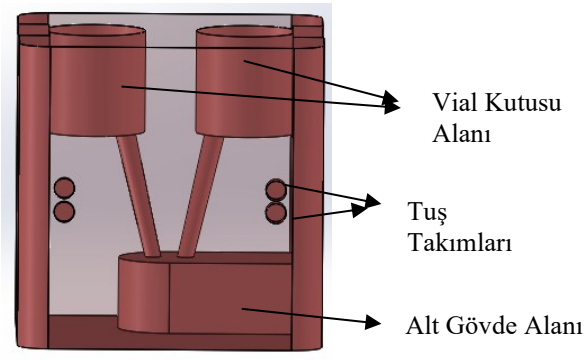
Şekil 9. Doktor özellik seçim ekranı

3.1.2. Donör makinası

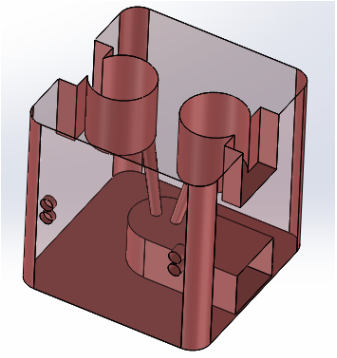
Bahsi geçen donör makinası Solidworks ile çizilmiş olup 5 parçadan oluşmaktadır. Bu donör makinasının sperm ve yumurtayı; gerekirse sperm ve yumurta bankasından, gerekirse kişilerin kendi sperm ve yumurtalarından alınarak birleştirileceği varsayılır.

3.1.2.1. Ana gövde

Şekil 10'da Donör Makinasının ana gövdesi bulunmaktadır.



Şekil 10. Ana gövde kısmı

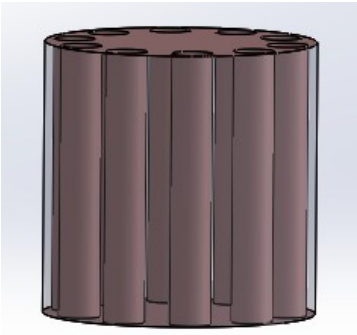


Şekil 11. Ana Gövde İzometrik Görünüş

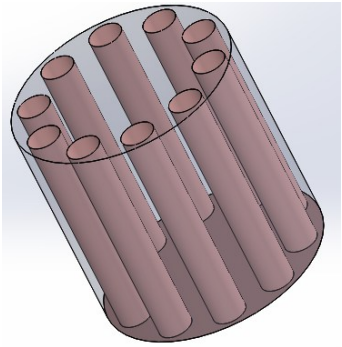
Şekil 11'de donör makinası ana gövdenin izometrik görünüşü görünmektedir. Vial kutusu alanları sperm ve yumurtanın içlerine konulması için ayrılmış özel alanlardır. Alt gövde alanı sperm ve yumurtanın birleştirileceği ana kısımdır. Üst tuş takımları vialleri döndürür, alt tuş takımları ise kapakları aç komutlarını verir.

3.1.2.2. Vial kutusu

Şekil 12'de görülen vial kutusu, ana gövdede toplamda 2 adet bulunmaktadır. Bir vial kutusunda 10 adet vial alanı vardır. İlgili çalışmaya göre vial kutularında belirlenen özelliklere ait sperm ve yumurtalar, ilgili viallere enjekte edilerek döllenme için hazırlanır.



Şekil 12. Vial kutusu



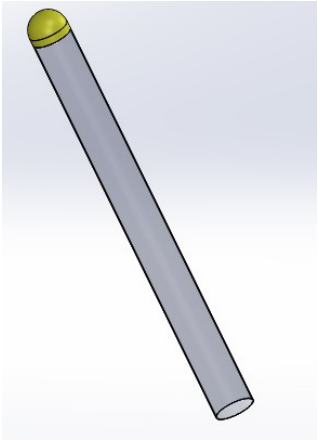
Şekil 13. Vial kutusu 2

Şekil 13'te vial kutusunun izometrik görünüşü görülmektedir. Vial kutusu; viallerin, içine konması için oluşturulmuş özel alanlardır. Bu kutular gerekirse temizlenmesi veya değiştirilmesi için ana gövdeden çıkarılabilir.

Seçilen 10 özellik ayrı ayrı viallere dağıtılır. Bu özellikler cinsiyet, göz rengi, saç rengi, saç tipi, burun büyüklüğü, ten rengi, boy uzunluğu, el kol uzunluğu, yüz yapısı, vücut tipidir. Bu özelliklere sahip DNA'lar, ayrı ayrı viallerin içine konularak, uygun olan seçenek için ortam hazırlanır.

3.1.2.3. Vial

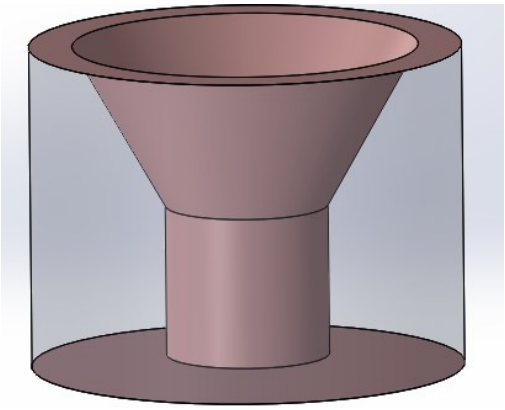
Şekil 14'te vial kutusunun içine yerleştirilen viallerden bir örnek bulunmaktadır. Bu vakumlu vialler bir cihazda toplamda 20 adet olmak üzere kullanılır. Seçilen özelliklere ait DNA örnekleri bu viallerin içine konulur ve uygun olanı kullanılır.



Şekil 14. Vial

3.1.2.4. Alt gövde

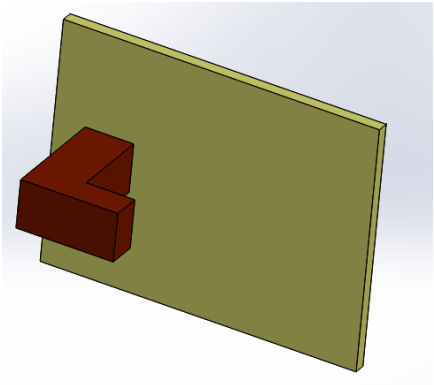
Şekil 15'te ana gövdenin altına takılmak üzere alt gövde sergilenmektedir. Alt gövde, uygun ve seçilen sperm ve yumurtanın birleştiği alandır. Bu alan da; sperm ve yumurtayı çekmek için vakumlu bir alandır. Alt gövde aynı vial kutusu gibi çıkarılıp temizlenebilir bir yapıya ve konuma sahiptir.



Şekil 15. Alt gövde

3.1.2.5. Kapı kolu ve gövdesi

Şekil 16'da ana gövdeye takılmak üzere bir kapı kolu örneği mevcuttur. Bu kapı kolu, vial kutularının ve alt gövdenin ana gövdeden çıkarılması için planlanmıştır.

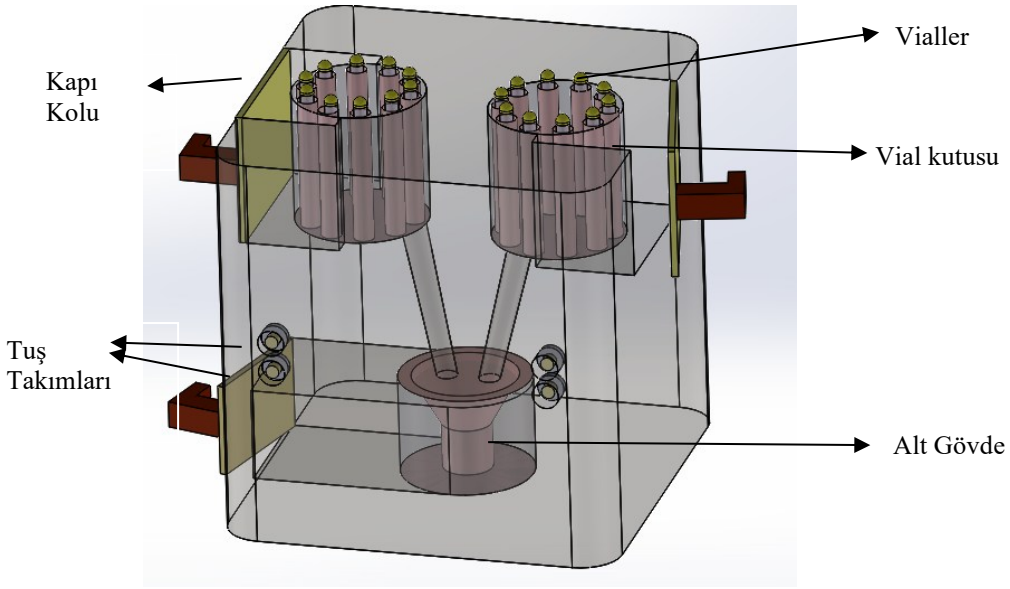


Şekil 16. Kapı kolu ve gövdesi

3.1.2.6. Donör makinası montajı

Şekil 17'de donör makinasının son hali görülmektedir. Burada üst taraftaki tuş takımları vial kutularının dönmelerini sağlarken, ikinci tuş takımları kapıların açılmasını sağlar.

Böylelikle makine montajı tamamlanmış olup, artık varsayılan kullanım için hazır duruma getirilmiştir.



Şekil 17 Donör makinası montajı

3. Sonuçlar ve tartışma

Yapay zeka ile alakalı çalışmalar göreceli olmakla birlikte göstermiştir ki, hayatımızın hemen her alanında kullanılıp bizlere her konuda kolaylıklar sağlamıştır. Özellikle sağlık alanında, hastalıkları önceden teşhis edip, hastaları bu konuda kontrol altına almakta ve hastane otomasyonlarında kullanılarak hastanelerin kaç yataklı olacağını, kaç çalışanları olacağını tahmin etmekte kullanılabilmektedir. Yapay zekalı robotlar doktorlara ameliyatlarda yardım edebilmekte aynı zamanda, tedavilerin sonraki aşamalarında hastaları takip edebilmektedir.

Tüp bebek tedavisinde hali hazırda cinsiyet seçimleri yapılabiliyorken, yapay zekalı bir tedavi ile özellik seçimleri bu çalışmada öngörülmüştür. İki aşamalı bir hastane otomasyonu ile, hastalar hastane sistemine kaydolup bebek özelliklerini seçebilirken, doktorlar bu özelliklerin sisteme tanımlanmasını ve kullanılmasını sağlarlar. Bu özelliklerin kullanılabilmesi için de bir Donör Makinası tasarlanmış olup, sperm ve yumurtaların özelliklerine göre bu makinanın kullanılacağı varsayılmıştır.

Mevcut uygulamalar halinde bebeklerin cinsiyetleri seçilebilirken, bu cihaz kullanımı ile birlikte sonraki aşamalarda sperm ve yumurta bankalarında kullanılmak üzere dondurulmuş embriyo transferleri de kullanılabilir.

Yapay zekalı bu sistem, insanların genlerinden sağlıksız olanları çıkarabilirken, sağlıklı genlerle birlikte istenen özelliklere sahip genlerin tüp bebek tedavisinde birlikte kullanılması günümüzdeki çalışmalardan bir sonraki aşama olarak incelenebilir.

Etik ve Yasal Görüşler

Tıbbi nedenler ile yapılan cinsiyet seçimi etik görülürken diğer nedenler etik bulunmamaktadır. Amerikan Üreme Tıbbı Derneği (ASRM), tıbbı nedenlerle yapılan cinsiyet belirlemeyi etik olarak kabul ederken, sosyal nedenlerle yapılan uygulamalar etik açıdan tartışmalıdır. Benzer şekilde, Avrupa İnsan Üreme ve Embriyoloji Derneği (ESHRE) de aile dengeleme amacıyla yapılan cinsiyet belirleme taleplerine dikkatli yaklaşılmasını önermektedir. Cinsiyet belirleme amaçlı yazılımlar ve yöntemler, etik ve yasal açıdan çeşitli tartışmalara neden olmaktadır. Bu uygulamaların, toplumsal cinsiyet dengesini etkileyebileceği ve bireylerin genetik özelliklerine müdahale etme hakkı konusunda etik sorular doğurabileceği belirtilmektedir [14]. Bu nedenle bu tür uygulamaların geliştirilmesi ve kullanımı sırasında etik kuralların ve yasal düzenlemelerin dikkate alınması önemlidir

Kaynaklar

[1] Öztürk K. & Şahin M. E., Yapay zekâ ağları ve yapay zekaya genel bir bakış, **Takvim-i Vakayı Dergisi**, 6(2), 30-32, (2018).

[2] Akkaya G., Yapay sinir ağları ve tarım alanındaki uygulamaları, **Atatürk Üniv. Ziraat Fak.Dergisi**, 38 (2), 198-201, (2007).

[3] Akalın B. & Veranyurt Ü, Sağlık hizmetleri ve yönetiminde yapay zeka, **İstanbul University Press Dergisi.** 5(1), 233-236, (2021).

[4] Buluz B. & İçer Z., Yapay zekanın ceza muhakemesindeki rolü ve geleceği, **İstanbul Üniversitesi Dergisi**, 13-33, (2019).

[5] Arslan K., Eğitimde yapay zeka ve uygulamaları, **Batı Anadolu Eğitim Bilimleri Dergisi**, 11(1), 80-86, (2020).

[6] Türe S. & Topuz S., Yapay zeka ve askeri uygulamalar, **Milsoft Yazılım Teknolojileri A.Ş Dergisi**, 7-17, (2020).

[7] Sarıgöz Y & Çağlar B., Endüstrideki yapay zeka uygulamaları. **Mimar Sinan Üniversitesi Dergisi**, 31, (2011).

[8] Bozöyük T. & Gökçe İ. & Yağcı C. & Akar G., Yapay zeka teknolojilerinin endüstrideki uygulamaları, **TC Marmara Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi**, (2005).

[9] Ercan F., Turizm Pazarlamasında yapay zeka teknolojilerinin kullanımı ve uygulama örnekleri, **AHBVÜ Turizm Fakültesi Dergisi**, 23(2), 394-410, (2020).

[10] Yücel G. & Adiloğlu B., Dijitalleşme- yapay zekâ ve muhasebe beklentiler, **Muhasebe ve Finans Tarihi Araştırmaları Dergisi**, 17(1), 54-57, (2019).

[11] Atilla A.Ş.,Yapay zeka teknolojisi ve uygulamaları**, İstanbul Dikey Eksen Dergisi**, 6, (2022).

[12] Gümüş E. & Medetoğlu B & Tutar S., Finans ve bankacılık sisteminde yapay zeka kullanımı: Kullanıcılar üzerinde bir uygulama, **Bucak İşletme Fakültesi Dergisi**, 3(1), 35-39, (2020).

[13] Mıjwıl M. & Sadıkoğlu E. & Cengiz E & Candan H., Siber güvenlikte yapay zekanın rolü ve önemi: Bir derleme, **Veri Bilimi Dergisi***,* 5(2), 102, (2022).

[14] Şahinoğlu S. & Atar S., Tıbbi olmayan cinsiyet seçimi; yeni teknolojiler-teknolojik gelişmeler ve etik tartışmalar, **Türkiye Biyoetik Dergisi,** 10(2), 68-78, (2023).

DOI:10.25092/baunfbed. 1549042 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 654-666, (2025)*

An alternating inertial forward-backward-forward algorithm for solving monotone inclusion problem and its applications

Ebru ALTIPARMAK*

Erzurum Technical University Faculty of Science, Department of Mathematics, Erzurum.

Geliş Tarihi (Received Date): 13.09.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 05.05.2025

Abstract

We present an alternating inertial forward-backward-forward algorithm designed to find the zeros of the sum of a maximally monotone operator and a single-valued monotone operator that is also Lipschitz continuous. This study aims to extend Tseng's forward-backward-forward algorithm by incorporating alternating inertial effects. We then apply our enhanced algorithm to address convex minimization problems. Key topics include the monotone inclusion problem, forward-backward-forward algorithm, the alternating inertial method, and convex minimization problems. Lastly, we explore the application of our proposed approach in image restoration, emphasizing its effectiveness and adaptability.

Keywords: *Monotone inclusion problem, forward-backward-forward algorithm, alternating inertial method, convex minimization problem, image restoration problem.*

Monoton kapsama problemini çözmek için alternatif eylemsiz ileri-geri-ileri ayırma algoritması ve uygulamaları

Öz

Maksimum monoton bir operatör ile tek değerli, aynı zamanda Lipschitz sürekli olan monoton bir operatörün toplamının sıfırlarını bulmak amacıyla tasarlanmış alternatif eylemsiz ileri-geri-ileri algoritmasını sunuyoruz. Bu çalışma, Tseng'in ileri-geri-ileri algoritmasını alternatif atalet etkilerini ekleyerek genişletmeyi amaçlamaktadır. Ardından, geliştirilmiş algoritmamızı konveks minimizasyon problemlerini ele almak için

*Ebru Altıparmak, ebru.altiparmak@erzurum.edu.tr, https://orcid.org/0000-0001-6722-0807

uyguluyoruz. Ana konular arasında monoton kapsama problemi, ileri-geri-ileri algoritması, alternatif eylemsiz yöntemi ve konveks minimizasyon problemleri yer almaktadır. Son olarak, önerdiğimiz yaklaşımın görüntü iyileştirme uygulamasını inceleyerek etkinliğini ve uygulanabilirliğini vurguluyoruz.

Anahtar kelimeler: *Monoton kapsama problemi, ileri-geri-ileri algoritması, alternatif eylemsiz metot, konveks minimizasyon problemi, görüntü iyileştirme problemi.*

1. Introduction

Let H be a real Hilbert space with the inner product $\langle .,. \rangle$, C be a nonempty closed, and convex subset of H and the induced norm $\| x \|$. This study aims to investigate the monotone inclusion problems as follows:

$$\text{find } x^* \in H \text{ such that } 0 \in (A+B)x^* \tag{1}$$

where $A: H \to H$ be a single-valued mapping and $B: H \to 2^H$ multi-valued mapping. This problem is of significant interest because it is central to various mathematical issues, including convex programming, variational inequalities, the split feasibility problem, and minimization problems, as discussed in references [1,2, 3, 4, 5]. It also has applications in machine learning, image processing, and linear inverse problems, see for detail these references [6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16].

Proximal point algorithm is a highly effective tool for solving monotone inclusion problems. To enhance its convergence, the literature presents an inertial proximal point algorithm. Among the most widely used methods for addressing monotone inclusion problems is the forward-backward algorithm, introduced by Lions and Mercier [17], which is formulated as:

$$x_{n+1} = J_{\lambda_k A}(I - \lambda_k B)x_k,$$

The forward-backward-forward algorithm was suggested by Tseng [18] and it generates an iterative the sequence $\{x_k\}$ via

$$\begin{cases} y_k = J_{\lambda_k A}(I - \lambda_k B)x_k, \\ x_{k+1} = y_k - \lambda_k(By_k - Bx_k), \quad \forall k \geq 0 \end{cases}$$

where $x_0 \in H$ is the starting point. The sequence $\{x_k\}$ converges weakly to a solution of if the sequence of stepsizes $\{\lambda_k\}$ is chosen in the interval $\left(0, \frac{1}{L}\right)$, where $L > 0$ is the Lipschitz constant of B. In [19], an inertial version of the forward-backward-forward primal-dual splitting algorithm was introduced.

In 2020, Bot et al. [19] introduced a relaxed inertial version of the following forward-backward-forward algorithm (RIFBF), to solve monotone inclusion problems:

$$\begin{cases} z_k = x_k + \alpha_k(x_k - x_{k-1}) \\ y_k = J_{\lambda_k A}(I - \lambda_k B)z_k \\ x_{n+1} = (1-\rho_k)z_k + \rho_k\big(y_k - \lambda_k(By_k - Bz_k)\big), \forall k \geq 1 \end{cases}$$

where $x_0, x_1 \in H$ are initial point, $\{\lambda_k\}$ and $\{\rho_k\}$ are sequences of positive numbers, and $\{\alpha_k\}$ is a sequence of nonnegative numbers, namely, inertial term. By taking $\rho_k = 1$ in RIFBF, the inertial forward-backward-forward Algorithm [20] can be obtained as follows:

$$\begin{cases} z_k = x_k + \alpha_k(x_k - x_{k-1}) \\ y_k = J_{\lambda_k A}(I - \lambda_k B)z_k \\ x_{n+1} = y_k - \lambda_k(By_k - Bz_k), \forall k \geq 1 \end{cases}$$

It is our aim in this study to propose an alternating inertial forward-backward-forward splitting algorithm in which Fejer monotonicity of $\|x_n - x\|$, namely, $\|x_{n+1} - x\| \leq \|x_n - x\|$, $x \in C \subset H$ is regained to some extent [21,22,23]. The article is structured as follows: we begin by recalling some basic definitions and lemmas, followed by the presentation and analysis of our algorithms in Section 3. In Section 4 and section 5, we discuss applications of the proposed method.

2. Preliminaries

In this part, let H be a real Hilbert space and C be a nonempty closed, and convex subset of H. Then, the weak convergence of $\{x_n\}$ to x is denoted by $x_n \rightharpoonup x$ as $n \to \infty$, and the strong convergence of $\{x_n\}$ to x is denoted by $x_n \to x$ as $n \to \infty$.

Definition 1: [24] Let $A: H \to H$ be a mapping. A is said to be, for all $u, v \in H$,

1. Monotone if

$\langle Au - Av, u - v\rangle \geq 0$,

2. L −Lipschitz continuous on H if there exists a constant $L > 0$ such that

$\|Au - Av\| \leq L\|u - v\|$.

If $L = 1$, then A is called nonexpansive.

Definition 2: A mapping $B: H \to 2^H$ is said to be monotone, if for every $u, v \in H$, $x \in Bu$ and $y \in Bv$, $\langle x - y, u - v\rangle \geq 0$. Moreover, B is said to be maximal monotone if it is monotone and if for every $(x, u) \in H$, $\langle x - y, u - v\rangle \geq 0$ for every $(v, y) \in Graph(B)$, $x \in Bu$.

Lemma 1: [24] Let $A: H \to H$ be a operator and let $B: H \to 2^H$ be a maximal monotone operator. Define for $\lambda > 0$, $T_\lambda := (I + \lambda B)^{-1}(I - \lambda A)$. Then we have, for all $\lambda > 0$, $F(T_\lambda) = (A + B)^{-1}(0)$.

Lemma 2: [24] Let $A: H \to H$ be a Lipschitz continuous and monotone operator and let $B: H \to 2^H$ be a maximal monotone operator. Then, $A + B$ is a maximal monotone operator.

Lemma 3: [25] Let H be a real Hilbert space. Hence, the following properties hold:

1. $\|x \pm y\|^2 = \|x\|^2 \pm 2\langle x, y\rangle + \|y\|^2$,

2. $\|x + y\|^2 \leq \|x\|^2 + 2\langle y, x + y\rangle$,

3. $\|\lambda x + (1 - \lambda)y\|^2 = \lambda\|x\|^2 + (1 - \lambda)\|y\|^2 - \lambda(1 - \lambda)\|x - y\|^2$,

for all $x, y \in H$, and $\lambda \in [0,1]$.

Definition 3: A sequence $\{x_n\} \subset H$ is said to converges weakly to $z \in H$ if

$\lim_{n\to\infty} \langle x_n, y\rangle = \langle z, y\rangle, \qquad \forall y \in H.$

Lemma 4: [1] Let C be a nonempty subset of H and $\{x_n\}$ be a sequence in H such that the following two conditions hold:

1. for every $x \in C$, $\lim_{n\to\infty}\|x_n - x\|$ exists,

2. every sequential weak cluster point of $\{x_n\}$ is in C,

Then, the sequence $\{x_n\}$ converges weakly to a point in C.

Lemma 5: Let C be a nonempty subset of H, and let $\{x_n\}$ be a sequence in H. Then x_n is Fejèr monotone with respect to a set C if

$\|x_{n+1} - x^*\| \leq \|x_n - x^*\|, \forall x^* \in \mathrm{C}.$

3. Main result

In this part, we examine an alternating inertial forward-backward-forward splitting algorithm, as well as a self-adaptive alternating inertial forward-backward-forward splitting algorithm, to address the monotone inclusion problem. The convergence of given algorithms is proven under the following conditions.

Condition 1: The solution set of monotone inclusion problem is a nonempty closed and convex subset of H, namely, $\Omega := (A+B)^{-1}(0) \neq \emptyset$.

Condition 2: $A: H \to H$ is monotone and L −Lipchitz continuous, and $B: H \to 2^H$ maximally monotone.

Algorithm 6 Alternating Inertial Forward-Backward-Forward Algorithm
Initialization: Choose $\mu \in (0,1)$, $0 \leq \alpha_n \leq \alpha < \frac{1-\mu}{1+\mu}$.
Iterative Steps:
Step 1: Compute

$$w_n = \begin{cases} x_n, & when\ n \text{ is } even \\ x_n + \alpha_n(x_n - x_{n-1}), & when\ n \text{ is } odd. \end{cases}$$

Step 2: Compute
$y_n = J_{\lambda_n B}(I - \lambda_n A)w_n$.
If $w_n = y_n$, then stop and y_n is a solution of problem. Else, go to Step 3.
Step 3: Compute
$x_{n+1} = y_n - \lambda_n(Ay_n - Aw_n)$,
where the stepsize sequence λ_{n+1} is updated as follows:

$$\lambda_{n+1} = \begin{cases} min\left\{\lambda_n, \frac{\mu\|y_n - w_n\|}{\|Ay_n - Aw_n\|}\right\}, & Ay_n \neq Aw_n \\ \lambda_n, & otherwise. \end{cases} \tag{2}$$

Remark 1: Let $\mu \in (0,1)$ and $\lambda > 0$. The sequence $\{\lambda_n\}$ generated by (2) is $\lambda_{n+1} \leq \lambda_n$,namely, nonicreasing and

$\lim_{n\to\infty}\lambda_n = \lambda \geq \min\left\{\lambda_1, \frac{\mu}{L}\right\}$.
Also,
$\|Ay_n - Aw_n\| \leq \frac{\mu}{\lambda_{n+1}}\|y_n - w_n\|, \forall n \geq 1$.

Lemma 7: Assume that Condition 1 and Condition 2 hold and let $\{x_n\}$ is generated by Algorithm 6. Then $\{x_{2n}\}$ is Fejer monotone with respect to Ω and $lim_{n\to\infty}\|x_{2n} - p\|$ exist, where $p \in \Omega$.

Proof: Let $p \in \Omega$. Note that,
$\|y_{2n+1} - p\|^2 = \|w_{2n+1} - p\|^2 + 2\langle y_{2n+1} - w_{2n+1}, w_{2n+1} - p\rangle$
$+\|w_{2n+1} - y_{2n+1}\|^2$ (3)
From the definition of $\{\lambda_n\}$ and definition of x_{n+1}, we have that
$\|x_{2n+2} - p\|^2 = \left\|y_{2n+1} - \lambda_{2n+1}(Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}) - p\right\|^2$
$= \|y_{2n+1} - p\|^2 - 2\lambda_{2n+1}\langle y_{2n+1} - p, Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}\rangle$
$+\lambda^2_{2n+1}\|Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}\|^2$
$= \|w_{2n+1} - p\|^2 + 2\langle y_{2n+1} - w_{2n+1}, w_{2n+1} - p\rangle$
$+\|w_{2n+1} - y_{2n+1}\|^2 - 2\lambda_{2n+1}\langle y_{2n+1} - p, Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}\rangle$
$= \|w_{2n+1} - p\|^2 - 2\langle y_{2n+1} - w_{2n+1}, y_{2n+1} - w_{2n+1}\rangle$
$+\lambda^2_{2n+1}\|Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}\|^2$
$+2\langle y_{2n+1} - w_{2n+1}, y_{2n+1} - p\rangle + \lambda^2_{2n+1}\|Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}\|$
$+\|w_{2n+1} - y_{2n+1}\|^2 - 2\lambda_{2n+1}\langle y_{2n+1} - p, Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}\rangle$
$= \|w_{2n+1} - p\|^2 - \|y_{2n+1} - w_{2n+1}\|^2 + \lambda^2_{2n+1}\|Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1}\|$
$-2\langle y_{2n+1} - p, w_{2n+1} - y_{2n+1} + \lambda_{2n+1}(Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1})\rangle$
$= \|w_{2n+1} - p\|^2 - \|y_{2n+1} - w_{2n+1}\|^2 + \mu^2\frac{\lambda^2_{2n+1}}{\lambda^2_{2n+2}}\|y_{2n+1} - w_{2n+1}\|^2$
$-2\langle y_{2n+1} - p, w_{2n+1} - y_{2n+1} + \lambda_{2n+1}(Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1})\rangle$
$= \|w_{2n+1} - p\|^2 - \left(1 - \mu^2\frac{\lambda^2_{2n+1}}{\lambda^2_{2n+2}}\right)\|y_{2n+1} - w_{2n+1}\|^2$
$-2\langle y_{2n+1} - p, w_{2n+1} - y_{2n+1} + \lambda_{2n+1}(Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1})\rangle$. (4)
In what follows, we are going to show that
$\langle y_{2n+1} - p, w_{2n+1} - y_{2n+1} + \lambda_{2n+1}(Ay_{2n+1} - Aw_{2n+1})\rangle \geq 0$. (5)
Since $y_{2n+1} = (I + \lambda_{2n+1}B)^{-1}(I - \lambda_{2n+1}A)w_{2n+1}$, we get $(I - \lambda_{2n+1}A)w_{2n+1} \in (I + \lambda_{2n+1}B)y_{2n+1}$ and since B maximal monotone there exists $v_{2n+1} \in By_{2n+1}$ such that $(I - \lambda_{2n+1}A)w_{2n+1} = y_{2n+1} + \lambda_{2n+1}v_{2n+1}$.
This means that
$v_{2n+1} = \frac{1}{\lambda_{2n+1}}(w_{2n+1} - y_{2n+1} - \lambda_{2n+1}Aw_{2n+1})$ (6)
On the other part, we have $0 \in (A + B)p$ and $Ay_{2n+1} + v_{2n+1} \in (A + B)y_{2n+1}$. Since $A + B$ is maximal monotone, we also have
$$\langle Ay_{2n+1} + v_{2n+1}, y_{2n+1} - p\rangle \geq 0. \quad (7)$$
By equation (6) and inequality (7), we obtain
$\frac{1}{\lambda_{2n+1}}\langle w_{2n+1} - y_{2n+1} - \lambda_{2n+1}Aw_{2n+1} + \lambda_{2n+1}Ay_{2n+1}, y_{2n+1} - p\rangle \geq 0$.
This shows that
$\langle w_{2n+1} - y_{2n+1} - \lambda_{2n+1}(Aw_{2n+1} - Ay_{2n+1}), y_{2n+1} - p\rangle \geq 0$.

By combining (4) with (5), we get

$$\|x_{2n+2}-p\|^2 \le \|w_{2n+1}-p\|^2 - \left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\|y_{2n+1}-w_{2n+1}\|^2. \quad (8)$$

Now, we observe the following norm,

$$\|w_{2n+1}-p\|^2 = \|x_{2n+1}+\alpha_{2n+1}(x_{2n+1}-x_{2n})-p\|^2$$
$$= \|(1+\alpha_{2n+1})(x_{2n+1}-p)-\alpha_{2n+1}(x_{2n}-p)\|^2$$
$$= (1+\alpha_{2n+1})\|x_{2n+1}-p\|^2 - \alpha_{2n+1}\|x_{2n}-p\|^2 + \alpha_{2n+1}(1+\alpha_{2n+1})\|x_{2n+1}-x_{2n}\|^2 \quad (9)$$

By using a similar line of reasoning as in the derivation of (9), one can demonstrate that

$$\|x_{2n+1}-p\|^2 \le \|w_{2n}-p\|^2 - \left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\|y_{2n}-w_{2n}\|^2$$
$$= \|x_{2n}-p\|^2 - \left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\|y_{2n}-w_{2n}\|^2. \quad (10)$$

By using (9) and (10), we obtain

$$\|w_{2n+1}-p\|^2 \le (1+\alpha_{2n+1})\left[\|x_{2n}-p\|^2 - \left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\|y_{2n}-w_{2n}\|\right]$$
$$-\alpha_{2n+1}\|x_{2n}-p\|^2 + \alpha_{2n+1}(1+\alpha_{2n+1})\|x_{2n+1}-x_{2n}\|^2$$
$$\le \|x_{2n}-p\|^2 - (1+\alpha_{2n+1})\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\|y_{2n}-w_{2n}\|$$
$$+\alpha_{2n+1}(1+\alpha_{2n+1})\|x_{2n+1}-x_{2n}\|^2. \quad (11)$$

It follows from (11) that

$$\|x_{2n+2}-p\|^2 \le \|x_{2n}-p\|^2 - (1+\alpha_{2n+1})\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\|y_{2n}-w_{2n}\|^2$$
$$+\alpha_{2n+1}(1+\alpha_{2n+1})\|x_{2n+1}-x_{2n}\|^2 - \left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n+1}^2}{\lambda_{2n+2}^2}\right)\|y_{2n+1}-w_{2n+1}\|^2.$$

Observe that

$$\|x_{2n+1}-x_{2n}\| = \left\|y_{2n}-\lambda_{2n}(Ay_{2n}-Aw_{2n})-x_{2n}\right\|$$
$$\le \|y_{2n}-x_{2n}\| + \lambda_{2n}\|Ay_{2n}-Aw_{2n}\|$$
$$\le \left(1+\mu\frac{\lambda_{2n}}{\lambda_{2n+1}}\right)\|y_{2n}-x_{2n}\|. \quad (12)$$

By (12) we have

$$\|x_{2n+2}-p\|^2 \le \|x_{2n}-p\|^2 - (1+\alpha_{2n+1})\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\|y_{2n}-w_{2n}\|^2$$
$$+\alpha_{2n+1}(1+\alpha_{2n+1})\left(1-\mu\frac{\lambda_{2n}}{\lambda_{2n+1}}\right)^2\|y_{2n}-w_{2n}\|^2$$
$$-\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n+1}^2}{\lambda_{2n+2}^2}\right)\|y_{2n+1}-w_{2n+1}\|^2$$
$$= \|x_{2n}-p\|^2 - (1+\alpha_{2n+1})\left[\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\right.$$
$$\left.-\alpha_{2n+1}\left(1-\mu\frac{\lambda_{2n}}{\lambda_{2n+1}}\right)^2\right]\|y_{2n}-w_{2n}\|^2 - \left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n+1}^2}{\lambda_{2n+2}^2}\right)\|y_{2n+1}-w_{2n+1}\|^2. \quad (13)$$

Since $\lambda_n \to \lambda > 0$, $\mu \in (0,1)$, and $0 \le \alpha_n \le \alpha < \frac{1-\mu}{1+\mu}$ we have

$$\lim_{n\to\infty}\left[\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right) - \alpha\left(1+\mu\frac{\lambda_{2n}}{\lambda_{2n+1}}\right)^2\right] = (1-\mu^2) - \alpha(1+\mu)^2 > 0, \quad (14)$$

and

$$\lim_{n\to\infty}\left[\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n}^2}{\lambda_{2n+1}^2}\right)\right]=(1-\mu^2)>0. \tag{15}$$

Let ϵ be fixed such that

$0<\epsilon<(1-\mu^2)-\alpha(1+\mu)^2\leq(1-\mu^2)$.

Consequently, based on equations (14) and (15) there exists $n_0\in\mathbb{N}$ such that

$$\left(1-\mu^2\frac{\lambda_{2n+1}^2}{\lambda_{2n+2}^2}\right)>\left(1-\mu^2\frac{\lambda_n^2}{\lambda_{n+1}^2}\right)-\alpha\left(1+\mu\frac{\lambda_n^2}{\lambda_{n+1}^2}\right)^2\geq\epsilon>0,\forall n\geq n_0.$$

From (12) we get,

$$\|x_{2n+2}-p\|^2\leq\|x_{2n}-p\|^2-(1+\alpha_{2n+1})\epsilon\|y_{2n}-w_{2n}\|^2$$
$$-\epsilon\|y_{2n+1}-w_{2n+1}\|^2, \tag{16}$$

which implies

$\|x_{2n+2}-p\|\leq\|x_{2n}-p\|$.

Therefore, $\lim_{n\to\infty}\|x_{2n}-p\|$ exists and this implies that $\{\|x_{2n}-p\|\}$ and $\{x_{2n}\}$ are bounded. Consequently, we have from (16),

$$\lim_{n\to\infty}\|y_{2n}-x_{2n}\|=0 \tag{17}$$

and

$$\lim_{n\to\infty}\|y_{2n+1}-w_{2n+1}\|=0. \tag{18}$$

Also, from (11) we conclude that

$$\lim_{n\to\infty}\|x_{2n+1}-x_{2n}\|=0. \tag{19}$$

Lemma 8: Suppose that Condition 1 and Condition 2 hold, and $\{x_n\}$ is generated by Algorithm 6. Let $x^*\in H$ denote the weak limit of the subsequence $\left\{x_{2n_j}\right\}$ of $\{x_{2n}\}$. Then $x^*\in\Omega$.

Proof: Given that $\{x_{2n}\}$ is bounded, there exists a subsequence $\left\{x_{2n_j}\right\}$ of $\{x_{2n}\}$ such that $x_{2n_j}\rightharpoonup x^*$. In view of (16) we can choose a subequence $\left\{y_{2n_j}\right\}$ of $\{y_{2n}\}$ such that $y_{2n_j}\rightharpoonup x^*$. Let $(u,v)\in Grap(A+B)$ that is, $u-Av\in Bv$ and we have

$$y_{2n_j}=\left(I+\lambda_{2n_j}B\right)^{-1}\left(I-\lambda_{2n_j}A\right)x_{2n_j}$$

also we have

$$\left(I-\lambda_{2n_j}A\right)x_{2n_j}\in\left(I+\lambda_{2n_j}B\right)$$

which implies that

$$\frac{1}{\lambda_{2n_j}}\left(x_{2n_j}-y_{2n_j}-\lambda_{2n_j}Ax_{2n_j}\right)\in By_{2n_j}.$$

By the maximal monotonicity of B we have

$$\left\langle v-y_{2n_j},u-Av-\frac{1}{\lambda_{2n_j}}\left(x_{2n_j}-y_{2n_j}-\lambda_{2n_j}Ax_{2n_j}\right)\right\rangle\geq 0$$

thus

$$\left\langle v-y_{2n_j},u\right\rangle\geq\left\langle v-y_{2n_j},Av-\frac{1}{\lambda_{2n_j}}\left(x_{2n_j}-y_{2n_j}-\lambda_{2n_j}Ax_{2n_j}\right)\right\rangle$$

$$=\left\langle v-y_{2n_j},Av-Ax_{2n_j}\right\rangle+\left\langle v-y_{2n_j},\frac{1}{\lambda_{2n_j}}\left(x_{2n_j}-y_{2n_j}\right)\right\rangle$$

$$=\left\langle v-y_{2n_j},Av-Ay_{2n_j}\right\rangle+\left\langle v-y_{2n_j},Ay_{2n_j}-Ax_{2n_j}\right\rangle$$

$$+\left\langle v-y_{2n_j},\frac{1}{\lambda_{2n_j}}\left(x_{2n_j}-y_{2n_j}\right)\right\rangle$$

$$\geq\left\langle v-y_{2n_j},Ay_{2n_j}-Ax_{2n_j}\right\rangle+\left\langle v-y_{2n_j},\frac{1}{\lambda_{2n_j}}\left(x_{2n_j}-y_{2n_j}\right)\right\rangle.$$

Since $\lim_{n\to\infty}\|y_{2n}-x_{2n}\|=0$ and A is Lipchitz continuous, we obtain

$\lim_{j\to\infty}\left\|Ay_{2n_j}-Ax_{2nj}\right\|=0$

which together with $\lim_{n\to\infty}\lambda_n=\lambda$ we have

$\langle v-p,u\rangle=\lim_{j\to\infty}\left\langle v-y_{2n_j},u\right\rangle\geq 0.$

Since the maximal monotonicity of $A+B$, we obtain $x^*\in(A+B)^{-1}(0)$.

Theorem 9: Suppose that Conditions 1 and 2 hold and $\{x_n\}$ is generated by Algorithm 6. Then, $\{x_n\}$ converges weakly to a element in Ω.

Proof: From Lemma 7, since $\{x_{2n}\}$ is bounded, hence $\{x_{2n}\}$ has weakly convergent subsequences. Assume $x^*\in H$ denotes the weak limit of such a subsequence $\left\{x_{2n_j}\right\}$ of $\{x_{2n}\}$. By Lemma 8, we have $x^*\in\Omega$. Also, by Lemma 7, we get $\lim_{n\to\infty}\|x_{2n}-p\|$. This indicates that, based on Lemma 4, the weak convergence of the sequence $\{x_{2n}\}$ to some element in the set Ω has been established. Moreover, from (17) we have for all $\overline{x}\in H$,

$|\langle x_{2n+1}-\overline{x},y\rangle|=|\langle x_{2n+1}-p+x_{2n}-x_{2n},\overline{x}\rangle|$

$\leq|\langle x_{2n}-p,\overline{x}\rangle|+|\langle x_{2n+1}-p,\overline{x}\rangle|$

$\leq|\langle x_{2n}-p,\overline{x}\rangle|+\|x_{2n+1}-x_{2n}\|\|\overline{x}\|\to 0,n\to\infty.$

Therefore, $\{x_{2n+1}\}$ converges weakly to x^* in Ω. Hence, the sequence $\{x_n\}$ converges weakly to a element $x^*\in(A+B)^{-1}(0)$.

4. Application to convex minimization problem

Let us consider the convex minimization problem as follows:

$$f(x^*)+g(x^*)=\min_{x\in H}\{f(x)+g(x)\}$$

Let $g:H\to R$ be a proper, convex, and lower semi-continuous function, $f:H\to R$ be convex and differentiable with a gradient ∇f that has an L-Lipschitz constant. According to the Baillon-Haddad theorem, ∇f is cocoercive with respect to L^{-1}, and the subdifferential of g, ∂g is maximally monotone. A point x^* is a solution of the convex minimization problem if and only if $0\in\nabla f(x^*)+\partial g(x^*)$. By setting $A=\nabla f$ and $B=\partial g$ in Algorithm 6, we can derive the following algorithm and corresponding theorem.

Algorithm 10

Initialization: Choose $\mu\in(0,1)$, $0\leq\alpha_n\leq\alpha<\frac{1-\mu}{1+\mu}$.

Iterative Steps:

Step 1: Compute

$$w_n = \begin{cases} x_n, & when\ n \text{ is } even \\ x_n + \alpha_n(x_n - x_{n-1}), & when\ n \text{ is } odd. \end{cases}$$

Step 2: Compute
$y_n = J_{\lambda_{n,\partial g}}(w_n - \lambda_n \nabla f(w_n))$.
If $w_n = y_n$, then stop and y_n is a solution of problem. Else, go to Step 3.

Step 3: Compute
$x_{n+1} = y_n - \lambda_n(\nabla f(y_n) - \nabla f(w_n))$,
where the stepsize sequence λ_{n+1} is updated as follows:

$$\lambda_{n+1} = \begin{cases} min\left\{\lambda_n, \dfrac{\mu\|y_n - w_n\|}{\|\nabla f(y_n) - \nabla f(w_n)\|}\right\}, & \nabla f(y_n) \neq \nabla f(w_n) \\ \lambda_n, & otherwise. \end{cases}$$

Theorem 11: Let $f: H \to R$ be a convex, differentiable with L −Lipschitz constant of ∇f and let $g: H \to R$ be a proper convex and lower semi-continuous function. Suppose that the solution set of convex minimization problem is nonempty. The parameters are subject to the same conditions as those stated in Theorem 9. Let $\{x_n\}$ be a sequence generated by Algorithm 10. Hence, $\{x_n\}$ converges weakly to x^*, which is a solution of the convex minimization problem.

5. Application to image restoration problem

This section demonstrates the application of the alternating inertial forward-backward-forward algorithm (Alternating Inertial FBF Algorithm) to the image restoration problem. Moreover, a comparative analysis is carried out between Alternating Inertial FBF Algorithm and Tseng's Algorithm.
The inverse problem in the following form serves to define a image restoration problem:

$$z = Ax + \kappa \tag{20}$$

where $x \in \mathbb{R}^d$ is original image, $A: \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}^m$ is a linear operator, $z \in \mathbb{R}^m$ is observed image and κ is the additive noise. It is widely recognized that problem (20) is approximately equivalent to several different optimization problems. Moreover, the l_1-norm is frequently employed as a regularization technique to address such problems. Consequently, the image restoration problem (20) can be reformulated as an l_1-regularization problem, expressed as follows:

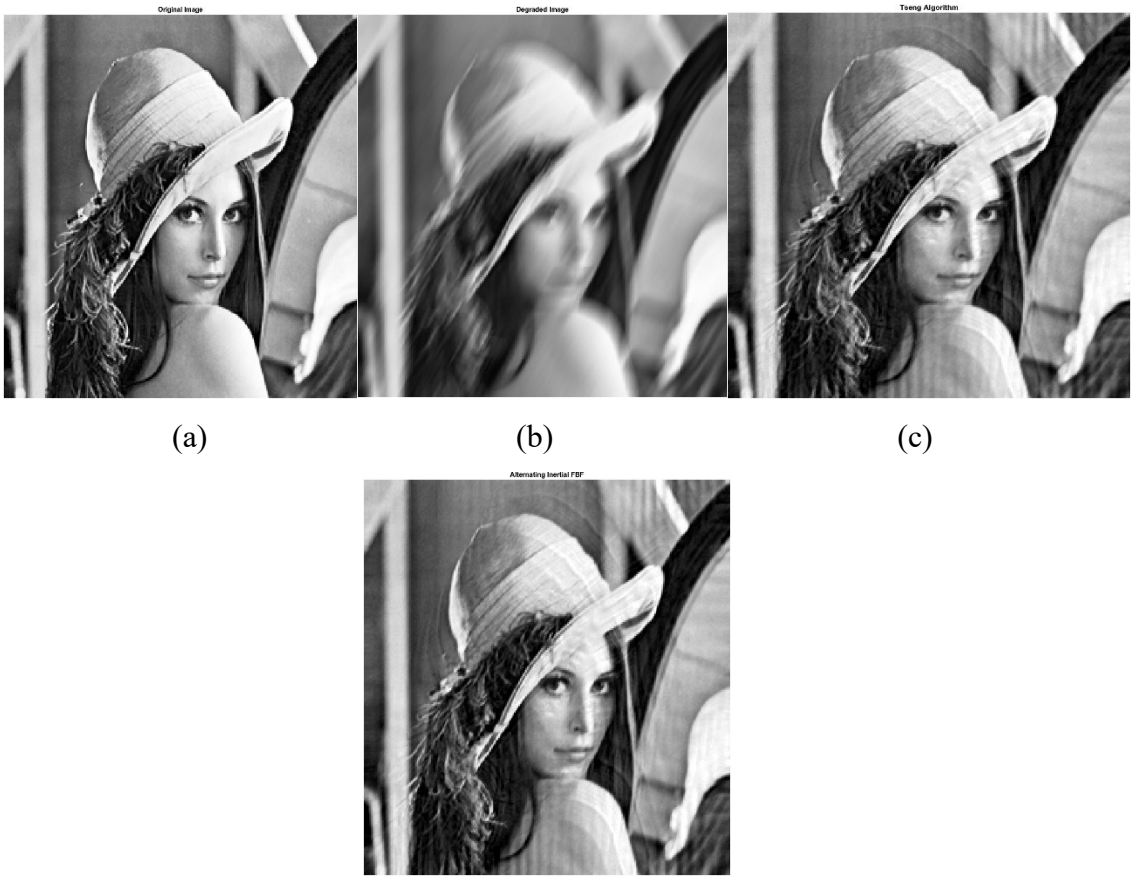
$$\min_{x \in \mathbb{R}^d} \left\{\frac{1}{2}\|Ax - z\|^2 + \sigma\|x\|_1\right\}. \tag{21}$$

where $\sigma > 0$ is a regularization parameter. On the other hand, For $f(x) = \frac{1}{2}\|Ax - z\|^2$ and $g(x) = \sigma\|x\|_1$, the convex minimization problem can be reduced to l_1- regularization problem. Based on this selection, the gradient of f, which is Lipschitz continuous, takes the form $\nabla f(x) = A^T(Ax - b)$, where A^T denotes the transpose of A.

Now, we show that Alternating Inertial FBF Algorithm is used to solve the image restoration problem (20) and also that this algorithm is compared to Tseng's Algorithm. In all comparison, we consider the motion blur functions and add random noise to the test Lena image. To evaluate the quality of the restored images, we use the signal-to-noise ratio (SNR), which is defined as follows:

$$SNR = 20\log\frac{\|x\|_2}{\|x-x_n\|_2},$$

where x and x_n are the original image and the estimated image at iteration n, respectively. All algorithms were implemented in MATLAB R2024b on an Asus computer equipped with an Intel(R) Core(TM) i9-14900HX 2.20 GHz processor and 32.0 GB of RAM. We compare Alternating Inertial FBF Algorithm with Tseng's Algorithm. We set $\alpha_n = 0.01$, $\lambda_n = 0.1$, maximum iteration=25000 and the regularization parameter $\sigma = 0.0001$. Figure 1 and Table 1 display the visual and numerical results corresponding to these selections



(a) (b) (c)

(d)

Figure 1. (a) Lena Image (b) Degraded image (c) Restorated Image by the Tseng's Algorithm (d) Restorated Image by the Alternating Inertial FBF Algorithm.

Table 1. Table of SNR values for the Lena image

	Alternating Inertial FBF Algorithm	Tseng's Algorithm
1	15.827333792615972	15.830448675610187
100	17.938677723877210	17.936446662849352
250	19.295244901185410	19.276080054466462
500	20.560027898189340	20.544342728972160
750	21.311493957050523	21.301216323622512
1000	21.825211913004175	21.817680738151750
2000	22.911456629047414	22.906426728660062
2500	23.203808851323588	23.183338688201420

As seen from the above table, the SNR value of Alternating Inertial FBF Algorithm is better than the Tseng's Algorithm, meaning it demonstrates better performance in image restoration.

6. Conclusion

In this study, we establish weak convergence results for the alternating forward-backward-forward splitting algorithm in Hilbert spaces, demonstrating its effectiveness in solving monotone inclusion problems. Furthermore, we apply our proposed algorithm to address convex minimization problems, showing that it can handle composite optimization tasks where the objective function is a sum of a differentiable function with a Lipschitz continuous gradient and a proper, convex, lower semi-continuous function. The numerical results demonstrate that the Alternating Inertial FBF Algorithm restores images with a higher SNR value than Tseng's Algorithm, suggesting it outperforms Tseng's Algorithm in image restoration. Also, our findings can be extended algorithm's applicability to a wide range of practical optimization problems in various fields, such as machine learning, and signal recovery.

References

[1] Opial, Z., Weak convergence of the sequence of successive approximations for nonexpansive mappings. **Bulletin of the American Mathematical Society,** 73(4), 591-597, (1967).

[2] Combettes, P.L., andWajs, V.R., Signal recovery by proximal forward-backward splitting. **Multiscale modeling and simulation** 4(4), 1168-1200, (2005).

[3] Daubechies, I., Defrise, M., and De Mol, C., An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint. **Communications on Pure and Applied Mathematics: Journal Issued by the Courant Institute of Mathematical Sciences** 57(11), 1413-1457, (2004).

[4] Duchi, J., and Singer, Y., Efficient online and batch learning using forward backward splitting. **The Journal of Machine Learning Research,** 10, 2899-2934, (2009).

[5] Padcharoen, A., Kitkuan, D., Kumam, and W., Kumam, P., Tseng methods with inertial for solving inclusion problems and application to image deblurring and image recovery problems. **Computational and Mathematical Methods** 3(3), 1088, (2021).

[6] Altiparmak, E., and Karahan, I., A new preconditioning algorithm for finding a zero of the sum of two monotone operators and its application to image restoration problems. **International Journal of Computer Mathematics**, 99(12), 2482-2498, (2022).

[7] Altiparmak, E., and Karahan, I., A modified preconditioning algorithm for solving monotone inclusion problem and application to image restoration problem**. Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest A**, 84, 81-92, (2022).

[8] Ungchittrakool, K., Cho, Y. J., Plubtieng, S., and Thammasiri, P., Accelerated Mann-type algorithm via two-step inertial points for solving a fixed point problem of a nonexpansive mapping and application to image restoration problems. **Numerical Computations: Theory and Algorithms NUMTA** 2023, 208, (2023).

[9] Jolaoso, L. O., Sunthrayuth, P., Cholamjiak, P., and Cho, Y. J., Inertial projection and contraction methods for solving variational inequalities with applications to image restoration problems. **Carpathian Journal of Mathematics**, 39(3), 683-704, (2023).

[10] Altıparmak, E., Jolaoso, L. O., Karahan, I., and Rehman, H. U., Pre-conditioning CQ algorithm for solving the split feasibility problem and its application to image restoration problem. **Optimization**, 1-19, (2024).

[11] Altiparmak, E., and Karahan, I., A modified inertial viscosity algorithm for an infinite family of nonexpansive mappings and its application to image restoration. **Journal of Industrial and Management Optimization**, 20(2), 453-477, (2024).

[12] Jolaoso, L. O., Bai, J., and Shehu, Y., New fast proximal point algorithms for monotone inclusion problems with applications to image recovery. **Optimization,** 1-26, (2024).

[13] Mungkala, C., Padcharoen, A., and Akkasriworn, N., Convergence of proximal gradient method with alternated inertial step for minimization problem. **Advances Fixed Point Theory,** 14, Article-ID 35, (2024).

[14] Suantai, S., Cholamjiak, P., Inkrong, P., and Kesornprom, S., A fast contraction algorithm using two inertial extrapolations for variational inclusion problem and data classification. **Carpathian Journal of Mathematics**, 40(3), 737-752, (2024).

[15] Suantai, S., Cholamjiak, P., Inkrong, P., and Kesornprom, S., Modified iterative schemes with two inertia and linesearch rule for split variational inclusion and applications to image deblurring and diabetes prediction. **Carpathian Journal of Mathematics,** 40(2), 459-476, (2024).

[16] Jolaoso, L. O., Shehu, Y., and Xu, H. K., New accelerated splitting algorithm for monotone inclusion problems. **Optimization**, 74(3), 781-810, (2025).

[17] Lions, P.L., and Mercier, B. Splitting algorithms for the sum of two nonlinear operators. **SIAM Journal on Numerical Analysis,** 16, 964-979, (1979).

[18] Tseng, P. A., Modified forward-backward splitting method for maximal monotone mappings. **SIAM Journal Control Optimization,** 38(2), 431-446, (2000).

[19] Bot, R. I., Sedlmayer, M., and Vuong, P. T. A relaxed inertial forward-backward-forward algorithm for solving monotone inclusions with application to GANs. **Journal of Machine Learning Research**, 24(8), 1-37, (2023).

[20] Boţ, R. I., and Csetnek, E. R., An inertial forward-backward-forward primal-dual splitting algorithm for solving monotone inclusion problems. **Numerical Algorithms**, 71, 519-540, (2016).
[21] Mu, Z., and Peng, Y., A note on the inertial proximal point method. **Statistics, Optimization and Information Computing,** 3(3), 241-248, (2015).
[22] Iutzeler, F., and Hendrickx, J.M., A generic online acceleration scheme for optimization algorithms via relaxation and inertia. **Optimization Methods and Software** 34(2), 383-405, (2019).
[23] Iutzeler, F., and Malick, J., On the proximal gradient algorithm with alternated inertia. **Journal of Optimization Theory and Applications,** 176(3), 688-710 (2018).
[24] Bauschke, H.H., Combettes, P.L.: Convex Analysis and Monotone Operator Theory in Hilbert Spaces. **Springer, Berlin,** (2011).
[25] Takahashi, W., Introduction to Nonlinear and Convex Analysis, **Yokohama Publishers,** 2009.

DOI:10.25092/baunfbed. 1583147 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 667-680, (2025)*

Chromatic indices of finite affine & projective planes and their duals

Abdurrahman DAYIOĞLU[1,*], Fatma ÖZEN ERDOĞAN[1]

[1]*Bursa Uludag University Faculty of Science and Arts, Department of Mathematics, Gorukle Campus, Bursa.*

Geliş Tarihi (Received Date): 11.11.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 05.05.2025

Abstract

In this study, rather than transitioning directly from geometric structures to graph theory, we have derived several general results and theorems concerning the coloring of points and lines within affine and projective structures. We approached this topic through the lens of vertex and edge coloring concepts, pivotal subjects within graph theory. Our investigation sheds light on the intricate relationship between geometric structures and graph theory, providing a novel perspective on coloring methodologies. Extending the principles of vertex and edge coloring to affine and projective spaces, we uncover fundamental insights into the interplay between geometry and combinatorial mathematics.

Keywords: *Affine plane, projective plane, chromatic index*

Sonlu Afin & Projektif düzlemlerin ve duallerinin kromatik indisleri

Öz

Bu çalışmada, doğrudan geometrik yapılardan graf teorisine geçiş yapmak yerine, afin ve projektif yapılardaki nokta ve doğruların renklendirilmesiyle ilgili birkaç genel sonuç ve teorem ürettik. Bu konuya, graf teorideki temel konular olan köşe ve kenar renklendirme kavramları merceğinden yaklaştık. Araştırmamız, geometrik yapılar ve graf teori arasındaki karmaşık ilişkiye ışık tutarak, renklendirme metodolojilerine yeni bir bakış açısı sağlıyor. Köşe ve kenar renklendirme ilkelerini afin ve projektif uzaylara genişleterek, geometri ve kombinatoryal matematik arasındaki etkileşime dair temel içgörüler ortaya çıkarıyoruz.

Anahtar kelimeler: *Afin Düzlem, projektif düzlem, kromatik indis*

[*]Abdurrahman DAYIOĞLU, dayioglu@uludag.edu.tr, https://orcid.org/0000-0001-8441-6406
Fatma Özen Erdoğan, fatmaozen@uludag.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-9691-4565

1. Introduction

The coloring of different geometrical structures was initially explored in various sources, particularly in the light of Erdos' article [1] titled *On The Combinatorial Problems Which I Would Most Like To See Solved*. A. Beutelspacher et al. also dealt with this issue in [2], and they calculated some boundaries for the chromatic indices of some projective spaces. This subject has continued its vitality with various studies since the 1980s.

Recent developments in this field can be found in [3], [4], [5], and [6]. On the other hand, we analyzed the concepts of graphs coloring and implemented this to finite affine and projective planes as well as their duals and revealed their relations.

Examining the historical context of geometric structures, it is evident that Hall [7] made a significant impact in his time. While he introduced the concept of partial planes, some writers, such as Batten [8], adopted his axiomatic approach and gave a similar Definition with a different name (near linear spaces), but some writers like Pickert [9] presented an alternative approach and gave a similar Definition with a different name (incidence structures).

2. Preliminaries

We start this section by giving some definitions and basic notions from [7] and [8], regarding affine and projective planes.

A *partial plane* is any system of points and lines such that
PT1) There is at most one line through any two distinct points.
PT2) There is at most one common point on two distinct lines.

A *space* $S = (\mathcal{P}, \mathcal{L})$ satisfies specific conditions or axioms, where $\mathcal{P}$ and $\mathcal{L}$ are sets of points and lines, respectively.

If $\mathcal{P} \cup \mathcal{L}$ is a finite set then the space $S = (\mathcal{P}, \mathcal{L})$ is called a *finite space*. If $\mathcal{P} \cup \mathcal{L}$ is finite then it's known that the sets $\mathcal{P}$ and $\mathcal{L}$ are finite and also we denote the number of points by $|\mathcal{P}| = v$ and the number of lines by $|\mathcal{L}| = b$.

A *near-linear space* is a space $S = (\mathcal{P}, \mathcal{L})$ with two conditions
NL1) Any line has at least two points.
NL2) Any two distinct points are on at most one line.

An *incidence structure* is a triple $(\mathcal{P}, \mathcal{L}, I)$ where I is a relation called an *incidence relation*, between $\mathcal{P}$ and $\mathcal{L}$. (i.e. $I \subseteq \mathcal{P}x\mathcal{L}$)
IS1) From $x\ I\ y$, it follows $x \in \mathcal{P},\ y \in \mathcal{L}$.
IS2) From $x_i\ I\ y_k$ $(i, k = 1,2)$, it follows $x_1 = x_2$ or $y_1 = y_2$.

The lines l and l' are called as *parallel* if $l \cap l' = \phi$ or $l = l'$ and we denote this by

$$l \parallel l'.$$

Definition 1: An *affine plane* $\mathcal{A}$ is a near linear space $(\mathcal{P}, \mathcal{L})$ satisfying following properties

A1) Any two distinct points lie on a unique line

A2) For each point p not on a line l, there is exactly one line l' passing through p such that l is parallel to l'

A3) There exists at least a set of three non-collinear points.

In this definition, the second condition, A2, is called *the axiom of parallelism*.

Definition 2: A *pencil* of parallel lines refers to a maximal set of lines in a plane that are mutually parallel. Equivalently, it can be defined as a set that includes a specific line along with all parallel lines.

Let's think an affine plane $\mathcal{A}$. We already know from [10] and [11] that the number of points on each line is the same in affine planes. Denoting the number of points per line by k, it is called as the *order* of $\mathcal{A}$. Consequently any point is on $k + 1$ lines [11].

We know also from [11] that each pencil of parallel lines determines an equivalence relation, the plane $\mathcal{A} = (\mathcal{P}, \mathcal{L})$ determines $k + 1$ equivalence classes on the set of k^2 points.

If the order of $\mathcal{A}$ is k then

1) There are $v = k^2$ points in $\mathcal{A}$.

2) There are exactly k lines parallel to any line.

3) $\mathcal{A}$ has $b = k^2 + k$ lines.

4) For any choosen line l, precisely k^2 lines intersect with l at one point.

5) There are $k + 1$ pencil of parallel lines and every pencil consists of k lines.

Definition 3: A projective plane Π is a near linear space $(\mathcal{P}, \mathcal{L})$ satisfying the followings:

P1) Any two distinct points lie on a particular line

P2) Any two distinct lines intersect at least at one point

P3) There exists at least a set of four points no three of them are collinear.

Let's suppose Π is a projective plane. We know from [10] and [11] that in the projective planes each line contains the same number of points, every point lies on same number of lines. This number is referred to as $k + 1$, where k is an integer greater than or equal to 2. The value of k is known as the *order of the projective plane* Π.

In a projective plane Π of order k, we know that in Π

$$v = b = k^2 + k + 1$$

In a finite affine or projective plane, a number $k \geq 2$ exists, known as the order of the plane. However, not every number k guarantees the existence of an affine or projective plane of that order. Ongoing studies are actively exploring whether affine or projective planes can exist in various orders. Refer to sources [10], [11], [12], and [13] for more details.

The Principal of Duality

We know from [12] that in projective planes, a certain dual relationship between them becomes apparent upon careful examination of the propositions of incidence. In a plane, a line is determined by two points on it, while a point is determined by two lines passing through it. Therefore, if, by using the propositions of incidence, we are able to prove a theorem involving points and lines, then, by using similar reasoning, we should be able to prove a corresponding theorem establishing by interchanging points and lines. The dual theorem is obtained from the original theorem merely by the interchanging certain words such as "point" and "line", "collinear" and "concurrent", "lie on" and "intersect in", and so on. This is known as the *principle of duality* in the plane. For an axiomatic approach we present Batten's [8] dual linear space definition with a slight difference in notion.

Definition 4: Let $S = (\mathcal{P}, \mathcal{L})$ be a near-linear space. The dual (near-linear) space $D(S) = (D(\mathcal{P}), D(\mathcal{L}))$ of S is defined as follows :

$$D(\mathcal{P}) = \mathcal{L},$$
$$D(\mathcal{L}) = \{[p] \mid s([p]) \geq 2,\ p \in \mathcal{P}\}$$

where $[p] = \{l \in \mathcal{L} \mid p\ I\ l\}$.

From [14], we know that dual of every theorem given in projective plane is also a theorem. We can also immediately deduce that this is not true in the case of an affine plane due to the propositions of incidence.

We will now present some fundamental concepts for graph theory from [15] and [16].

Let $G = (V, E)$ be a multigraph with n vertices (*order*) and m edges (*size*). Let's take x and y be two vertices in graph G. If $e = \{x, y\}$ is an edge, we can denote this as $e = xy$. The vertices x and y are referred to as *adjacent vertices* written as $(x \sim y)$ and are considered the endpoints of the edge *e*. The edge $e = \{x, y\}$ is said to be incident with x and y. In graph theory, an edge characterized by both ends being identical is termed a *loop*, while an edge distinguished by having distinct endpoints is referred to as a *link*. When multiple links share the same pair of endpoints, they are classified as *parallel edges*. G is classified as *simple* if it excludes both loops and parallel edges. The *degree of a vertex v*, denoted as $d(v)$, is the number of edges incident with *v*. A graph G is said to be *regular* if every vertex in G has the same degree. More precisely, G is said to be *k-regular* if $d(v) = k$ for each vertex *v* in G, where $k \geq 0$.

A graph coloring of G assigns different colors to adjacent vertices. The *chromatic number* $\chi(G)$ is the minimal number of colors needed in a coloring of G.

Lemma 1: Assume that G is a graph. $\chi(G) \leq \Delta(G) + 1$ where $\Delta(G)$ shows the maximum degree of a vertex in G.

When we assign a color to each edge in a graph, ensuring that any two edges sharing a common vertex have different colors, we call this process *edge coloring*. The minimum number of colors required for a proper edge coloring of a graph G is known as the *chromatic index* or *the edge chromatic number*, denoted as $\chi'(G)$.

3. Chromatic indicies for affine & projective planes and their dual spaces

As a new contribution to this topic, let's present our definitions and theorems regarding point and line coloring for both affine and projective planes.

Definition 5: In an incidence structure $\mathcal{A} = (\mathcal{P}, \mathcal{L})$, provided that the collinear points are painted in different colors, the function between the points of the plane and a set $R = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_v\}$ where $|\mathcal{P}| = v$, which is constructed so that the image set contains the minimum number of elements, is called the *point coloring* of the structure. The number of elements of the image set of this function is the *point chromatic index* of the structure, and it is denoted by $\chi(\mathcal{A})$.

Definition 6: In an incidence structure $\mathcal{A} = (\mathcal{P}, \mathcal{L})$, provided that the intersecting lines are painted in different colors, the function between the lines of the plane and a set $R = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_b\}$ where $|\mathcal{L}| = b$, which is constructed so that the image set contains the minimum number of elements, is called the *line coloring* of the structure. The number of elements of the image set of this function is the *line chromatic index* of the structure, and it is denoted by $\chi'(\mathcal{A})$.

The smallest affine plane, let's call it $\mathcal{A}_2 = (\mathcal{P}_2, \mathcal{L}_2)$ has order 2. It has 4 points and 6 lines and can be represented as below:

$$\mathcal{P}_2 = \{1,2,3,4\},$$
$$\mathcal{L}_2 = \{l_1 = \{1,2\}, l_2 = \{3,4\}, l_3 = \{1,3\}, l_4 = \{2,4\}, l_5 = \{1,4\}, l_6 = \{2,3\}\}.$$

The lines can be categorized into three sets of parallel lines:

$$l_1 \parallel l_2, \quad l_3 \parallel l_4, \quad l_5 \parallel l_6.$$

In a geometric structure, we will show the points with large dots and the lines with curves (possibly straight lines) that do not contain corners. The affine plane $\mathcal{A}_2 = (\mathcal{P}_2, \mathcal{L}_2)$ is shown in Figure 1.

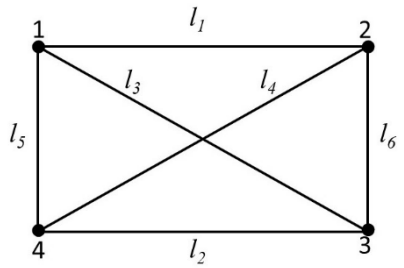


Figure 1: Affine plane of order 2

Since all the point pairs are collinear, we have to color every one of them differently. Therefore we get $\chi(\mathcal{A}_2) = 4$.

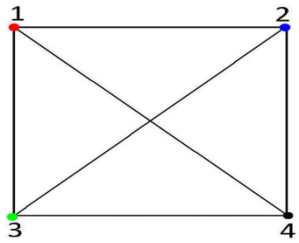


Figure 2: Point coloring for affine plane of order 2

Since there are only three pencils, we have to color each pencil with a different color. Therefore we get $\chi'(\mathcal{A}_2) = 3$.

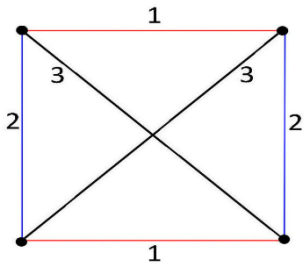


Figure 3: Line coloring for affine plane of order 2

The dual of smallest affine plane, let's call it $D(\mathcal{A}_2) = (D(\mathcal{P}_2), D(\mathcal{L}_2))$, has 6 points and 4 lines and can be represented as below:

$$D(\mathcal{P}_2) = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6\},$$

$$D(\mathcal{L}_2) = \{L_1 = \{l_1, l_3\ l_5\}, L_2 = \{l_1, l_4, l_6\}, L_3 = \{l_2, l_3, l_6\}, L_4 = \{l_2, l_4, l_5\}\}.$$

The dual of the affine plane, $D(\mathcal{A}_2) = (D(\mathcal{P}_2), D(\mathcal{L}_2))$, is shown in Figure 4.

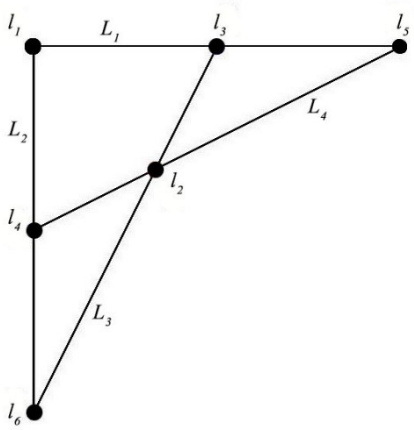


Figure 4: Dual of the affine plane of order 2

Considering the coloring of the points for incidence structures we defined earlier, it can be seen for $D(\mathcal{A}_2)$, the dual of the affine plane of order 2, that $\chi(D(\mathcal{A}_2)) = 3$.

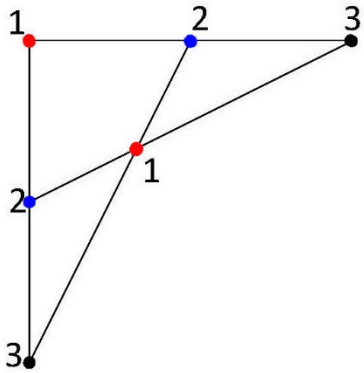


Figure 5: Point coloring for dual of the affine plane of order 2

Similarly we can see that $\chi'(D(\mathcal{A}_2)) = 4$.

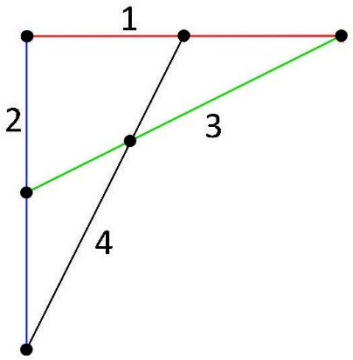


Figure 6: Line coloring for dual of the affine plane of order 2

Let us take $\mathcal{A}_3$ as the affine plane of order 3 with points and lines given, respectively. $\mathcal{A}_3 = (\mathcal{P}_3, \mathcal{L}_3)$ illustrated by Figure 7.

$$\mathcal{P}_3 = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9\},$$

$$\mathcal{L}_3 = \{l_1 = \{1,2,3\}, l_2 = \{4,5,6\}, l_3 = \{7,8,9\}, l_4 = \{1,4,7\}, l_5 = \{2,5,8\}, l_6 = \{3,6,9\},$$

$$l_7 = \{1,5,9\}, l_8 = \{2,6,7\}, l_9 = \{3,4,8\}, l_{10} = \{3,5,7\}, l_{11} = \{1,6,8\}, l_{12} = \{2,4,9\}\}$$

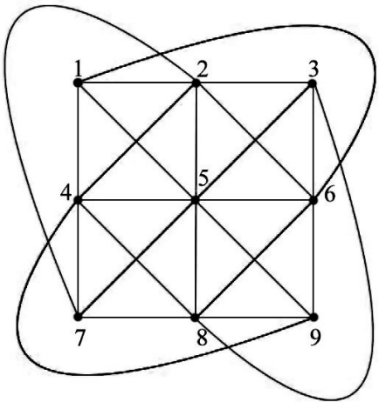


Figure 7: Affine plane of order 3

Since all the point pairs are collinear, we have to color every one of them differently. Therefore we get $\chi(\mathcal{A}_3) = 9$.

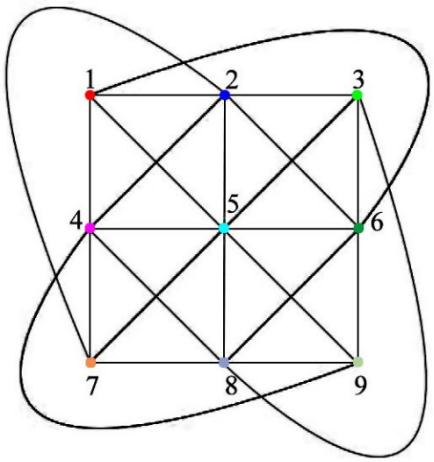


Figure 8: Point coloring for affine plane of order 3

Since there are only four pencils, we have to color each pencil with a different color. Therefore we get $\chi'(\mathcal{A}_3) = 4$.

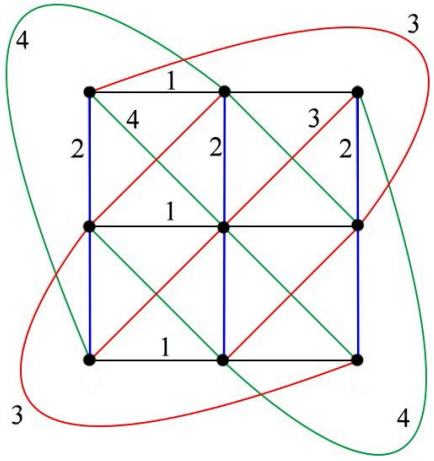


Figure 9: Line coloring for affine plane of order 3

The dual of the affine plane of order 3, let's call it $D(\mathcal{A}_3) = (D(\mathcal{P}_3), D(\mathcal{L}_3))$, has 12 points and 9 lines and can be represented as below:

$$D(\mathcal{P}_3) = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_{11}, l_{12}\},$$
$$D(\mathcal{L}_3) = \{L_1 = \{l_1, l_4\ l_9, l_{10}\}, L_2 = \{l_1, l_5, l_8, l_{11}\}, L_3 = \{l_1, l_6, l_7, l_{12}\},$$
$$L_4 = \{l_2, l_4, l_8, l_{12}\}, L_5 = \{l_2, l_5, l_7, l_{10}\}, L_6 = \{l_2, l_6, l_9, l_{11}\},$$
$$L_7 = \{l_3, l_4, l_7, l_{11}\}, L_8 = \{l_3, l_5, l_9, l_{12}\}, L_9 = \{l_3, l_6, l_8, l_{10}\}\}.$$

The dual of the affine plane of order 3, $D(\mathcal{A}_3) = (D(\mathcal{P}_3), D(\mathcal{L}_3))$, is shown in Figure 10.

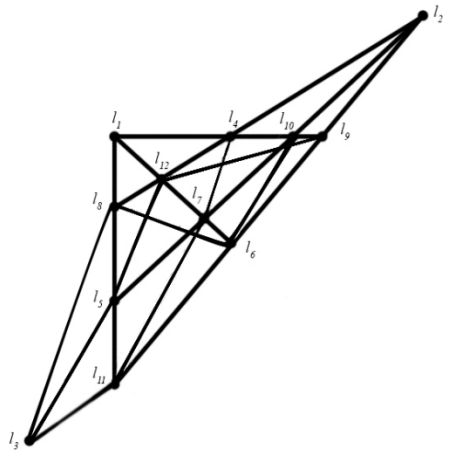


Figure 10: Dual of the affine plane of order 3

Considering the coloring of the points for incidence structures we defined earlier, it can be seen for $D(\mathcal{A}_3)$, the dual of the affine plane of order 3, that $\chi(D(\mathcal{A}_3)) = 4$.

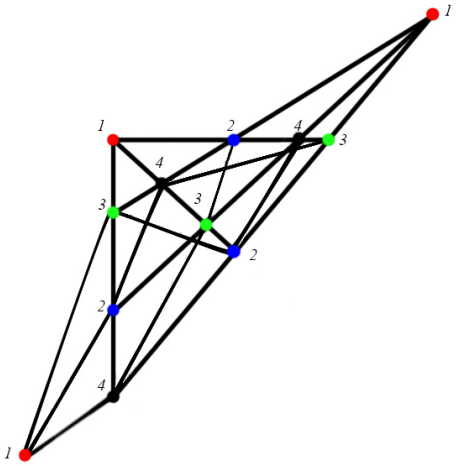


Figure 11: Point coloring for dual of the affine plane of order 3

Similarly we can see that $\chi'(D(\mathcal{A}_3)) = 9$.

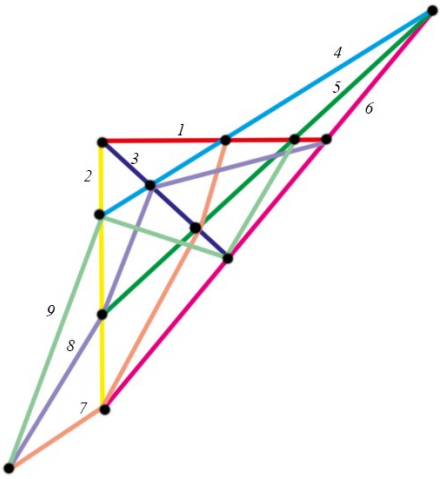


Figure 12: Line coloring for dual of the affine plane of order 3

To be able to see the pattern more clearly we can continue with the 4th order affine plane, but with a slight difference, we will not illustrate it this time but we give a table for it. Let us take $\mathcal{A}_4 = (\mathcal{P}_4, \mathcal{L}_4)$ as the affine plane of order 4 with points and lines given, respectively.

$$\mathcal{P}_4 = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16\},$$

$$\mathcal{L}_4 = \{l_1 = \{1,2,3,4\}, l_2 = \{5,6,7,8\}, l_3 = \{9,10,11,12\}, l_4 = \{13,14,15,16\},$$

$$l_5 = \{1,5,9,13\}, l_6 = \{2,6,10,14\}, l_7 = \{3,7,11,15\}, l_8 = \{4,8,12,16\},$$

$$l_9 = \{1,6,11,16\}, l_{10} = \{2,5,12,15\}, l_{11} = \{3,8,9,14\}, l_{12} = \{4,7,10,13\}$$

$$l_{13} = \{1,7,12,14\}, l_{14} = \{2,8,11,13\}, l_{15} = \{3,5,10,16\}, l_{16} = \{4,6,9,15\},$$

$$l_{17} = \{1,8,10,15\}, l_{18} = \{2,7,9,16\}, l_{19} = \{3,6,12,13\}, l_{20} = \{4,5,11,14\}\}$$

Since all the point pairs are collinear, we have to color every one of them differently. Therefore we get $\chi(\mathcal{A}_4) = 16$.

Since there are only five pencils of parallel lines, we have to color each pencil with a different color. Therefore we get $\chi'(\mathcal{A}_4) = 5$.

The dual of affine plane of order 4, let's call it $D(\mathcal{A}_4) = (D(\mathcal{P}_4), D(\mathcal{L}_4))$, has 20 points and 16 lines and can be represented as below.

$$D(\mathcal{P}_4) = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{14}, l_{15}, l_{16}, l_{17}, l_{18}, l_{19}, l_{20}\},$$

$$D(\mathcal{L}_4) = \{L_1 = \{l_1, l_5\ l_9, l_{13}, l_{17}\}, L_2 = \{l_1, l_6, l_{10}, l_{14}, l_{18}\}, L_3 = \{l_1, l_7, l_{11}, l_{15}, l_{19}\},$$

$$L_4 = \{l_1, l_8, l_{12}, l_{16}, l_{20}\}, L_5 = \{l_2, l_5, l_{10}, l_{15}, l_{20}\}, L_6 = \{l_2, l_6, l_9, l_{16}, l_{19}\},$$

$$L_7 = \{l_2, l_7, l_{12}, l_{13}, l_{18}\}, L_8 = \{l_2, l_8, l_{11}, l_{14}, l_{17}\}, L_9 = \{l_3, l_5, l_{11}, l_{16}, l_{18}\},$$

$$L_{10} = \{l_3, l_6, l_{12}, l_{15}, l_{17}\}, L_{11} = \{l_3, l_7, l_9, l_{14}, l_{20}\}, L_{12} = \{l_3, l_8, l_{10}, l_{13}, l_{19}\},$$

$$L_{13} = \{l_4, l_5, l_{12}, l_{14}, l_{19}\}, L_{14} = \{l_4, l_6, l_{11}, l_{13}, l_{20}\}, L_{15} = \{l_4, l_7, l_{10}, l_{16}, l_{17}\},$$

$$L_{16} = \{l_4, l_8, l_9, l_{15}, l_{18}\}\}.$$

We investigate the collinearity of points in the dual of the affine plane of order 4 in the Appendix section. Considering the coloring of the points for incidence structures we defined earlier and the Appendix, it can be seen for $D(\mathcal{A}_4)$, which is the dual affine plane of order 4, that $\chi(D(\mathcal{A}_4)) = 5$.

Similarly we can see that $\chi'(D(\mathcal{A}_4)) = 16$.

Now we can generalize our results as below.

Theorem 1: Let $\mathcal{A}_n = (\mathcal{P}_n, \mathcal{L}_n)$ be a an affine plane of order n. The point chromatic index of $\mathcal{A}_n$ is

$$\chi(\mathcal{A}_n) = n^2.$$

Proof. Since A1 must hold in every affine plane, we know that any two points must contain within a unique line. So, we don't have any non-collinear point pairs. Therefore,

in an affine plane of order n, there must be n^2 points that we have to color differently. Thus, the point chromatic index of $\mathcal{A}_n$ must be equal to n^2, which is the number of points.

Theorem 2: Let $D(\mathcal{A}_n) = (D(\mathcal{P}_n), D(\mathcal{L}_n))$ be the dual of an affine plane of order n. The point chromatic index of $D(\mathcal{A}_n)$ is

$$\chi(D(\mathcal{A}_n)) = n + 1.$$

Proof. In an affine plane of order n, there are $n + 1$ pencils of parallel lines, and each pencil consists of n lines. Moreover, lines within the same pencil are pairwise parallel. Let l_i, l_j be in the same pencil. This means that if two lines l_i and l_j belong to the same pencil, they do not intersect in the affine plane. Mathematically, this meansthat there does not exist a point a_k (where $1 \leq k \leq n^2$) such that a_k belongs to both l_i and l_j. In other words,

$$(1 \leq k \leq n^2) \wedge \left(a_k \in l_i \wedge a_k \in l_j\right)$$

never holds when $l_i \parallel l_j$.

Applying the duality principle, points in the dual plane correspond to lines in the original affine plane, and lines in the dual plane correspond to points in the original affine plane. Since no two lines in the same pencil intersect in the affine plane, their corresponding points in the dual plane do not lie on the same line.

Therefore, in the dual plane, the points corresponding to a single pencil in the affine plane form an independent set in terms of graph coloring, meaning they can be assigned the same color. Since there are $n^2 + n$ lines in the affine plane and every pencil consists of n lines, it follows that the minimum number of required colors is,

$$\frac{n^2 + n}{n} = n + 1$$

Theorem 3: Let $\mathcal{A}_n = (\mathcal{P}_n, \mathcal{L}_n)$ be a an affine plane of order n. The line chromatic index of $\mathcal{A}_n$ is

$$\chi'(\mathcal{A}_n) = n + 1.$$

Proof. Due to the Definition 2, the line chromatic index of a structure, we are trying to label the non-intersecting lines in an affine plane. This can very well be perceived as the parallel lines or pencils of that affine plane. Since there are only $n + 1$ pencils in an affine plane of order n, the line chromatic index must be also $n + 1$.

Theorem 4: Let $D(\mathcal{A}_n) = (D(\mathcal{P}_n),\ D(\mathcal{L}_n))$ be the dual of an affine plane of order n. The line chromatic index of $D(\mathcal{A}_n)$ is

$$\chi'(D(\mathcal{A}_n)) = n^2.$$

Proof. Since A1 applies to every affine plane, we know that any two points must be contained in a unique line. By duality, this implies that any two distinct lines in the dual

plane must intersect at a unique point. Hence, there are no parallel (non-intersecting) lines in the dual plane.

Consequently, in the dual of the affine plane of order n, the n^2 lines form an incidence structure in which every pair of distinct lines meets at a unique point. Therefore, the line chromatic index of $D(\mathcal{A}_n)$ is equal to the total number of lines in $D(\mathcal{A}_n)$.

Theorem 5: Let $\Pi_n = (\mathcal{P}_n, \mathcal{L}_n)$ be a projective plane of order n and $D(\Pi_n) = (D(\mathcal{P}_n), D(\mathcal{L}_n))$ be a dual projective plane of order n. The point chromatic index and the line chromatic index of Π_n and $D(\Pi_n)$ are:

$$\chi(\Pi_n) = \chi'(\Pi_n) = \chi(D(\Pi_n)) = \chi'(D(\Pi_n)) = n^2 + n + 1.$$

Proof. Since P1 and P2 must hold in every projective plane, we know that any pair of distinct points determine a single line and that any two lines intersect at a single point. Therefore we must color $n^2 + n + 1$ points and $n^2 + n + 1$ lines with different colors. Thus, the point chromatic index and the line chromatic index of Π_n and $D(\Pi_n)$ must be equal to the number of points and number of lines in the projective plane of order n.

4. Conclusion

We defined point and line chromatic indices for affine and projective planes as well as their duals. We also reach some interesting results and comprehensive theorems for such geometric structures.

Our findings contribute to the broader discourse on graph coloring techniques, offering new avenues for exploration in both geometric and combinatorial domains.

Furthermore, our results have practical implications for various fields, including computer science, where graph coloring algorithms play a crucial role in solving optimization problems. By bridging the gap between geometric structures and graph theory, our study paves the way for future research endeavors to leverage the rich interconnections between these disciplines.
In order to observe what we have done in this study in a more general framework, we are doing a similar study for linear spaces and their duals. In this context, we think we can find more unique results when the scope of geometric structures is expanded.

There are also various geometric structures that do not have the condition for the points that any two of them must lie on a unique line. For example, near-linear spaces are one of them, and examining the chromatic indices in such spaces will lead to many different results. Those results holds immense promise for applications in fields like computer networks, image processing, and neural networks, where mathematical irregularities can spark innovation and drive technological advancement.

References

[1] Erdös P., On The Combinatorial Problems Which I Would Most Like To See Solved, **Combinatorica** pages 25–42, https://doi.org/10.1007/BF02579174, (1981).

[2] Beutelspacher, A., Jungnickel, D.; Vanstone, S.A., On the chromatic index of a finite projective space, **Geom Dedicata** 32, 313–318, https://doi.org/10.1007/BF00147923, (1989).

[3] Araujo-Pardo, G., Kiss, G., Rubio-Montiel, C., Vázquez-Avila, A., On chromatic indices of finite affine spaces, **arXiv preprint,** arXiv:1711.09031, (2017).

[4] Xu,L., Feng, T., The chromatic index of finite projective spaces, **J. Combin. Des**., 31, 432–446, https://doi.org/10.1002/jcd.21904, (2023).

[5] Meszka M., The Chromatic Index of Projective Triple Systems, **J. Combin. Designs**, 21: 531-540, https://doi.org/10.1002/jcd.21368, 2013.

[6] Ozeki, K., Kempe Equivalence Classes of Cubic Graphs Embedded on the Projective Plane, **Combinatorica**, 42 (Suppl 2), 1451–1480, https://doi.org/10.1007/s00493-021-4330-2, (2022).

[7] Hall, M., Projective Planes, **Trans. Am. Math. Soc.** , 54, 229-77, (1943) and correction, 65, 473-4, (1949).

[8] Batten, L. M., **Combinatorics of Finite Geometries, 2nd edition**, Cambridge University Press: New York, (1997).

[9] Pickert G., **Projektive Ebenen**, Springer-Verlag: Berlin, Gottingen, Heidelberg, (1955).

[10] Hughes, D. R., Piper, F. C., **Projective Planes**, Springer: New York, (1973).

[11] Bennett, M. K., **Affine and Projective Geometry**, John Wiley-Interscience: New York, (1995).

[12] Faulkner T. E., **Projective Geometry**, Dover: New York, (1949).

[13] Lam, C. W. H., Thiel, L., Swiercz, S., The Non-Existence of Finite Projective Planes of Order 10. **Canadian Journal of Mathematics**, 41-6: 1117–1123, https://doi.org/10.4153/CJM-1989-049-4, (1989).

[14] Kaya, R., **Projektif Geometri**, Osmangazi Üni. Yayınları: Eskişehir, (2005).

[15] Jungnickel, D., **Graphs, Networks and Algorithms**, Springer: Augsburg, (2013).

[16] Bondy A., Murty, U.S.R., **Graph Theory**, Springer: London, (2008).

Appendix

The point chromatic index of $D(\mathcal{A}_4)$ can easily be calculated using the information given in the table below:

Table for $D(\mathcal{A}_4)$

$l_1 \vee l_2 = \Phi$	$l_2 \vee l_3 = \Phi$	$l_3 \vee l_4 = \Phi$	$l_4 \vee l_5 = L_{13}$	$l_5 \vee l_6 = \Phi$	$l_6 \vee l_7 = \Phi$	$l_7 \vee l_8 = \Phi$	$l_8 \vee l_9 = L_{16}$	$l_9 \vee l_{10} = \Phi$	$l_{10} \vee l_{11} = \Phi$										
$l_1 \vee l_3 = \Phi$	$l_2 \vee l_4 = \Phi$	$l_3 \vee l_5 = L_9$	$l_4 \vee l_6 = L_{14}$	$l_5 \vee l_7 = \Phi$	$l_6 \vee l_8 = \Phi$	$l_7 \vee l_9 = L_{11}$	$l_8 \vee l_{10} = L_{12}$	$l_9 \vee l_{11} = \Phi$	$l_{10} \vee l_{12} = \Phi$										
$l_1 \vee l_4 = \Phi$	$l_2 \vee l_5 = L_5$	$l_3 \vee l_6 = L_{10}$	$l_4 \vee l_7 = L_{15}$	$l_5 \vee l_8 = \Phi$	$l_6 \vee l_9 = L_6$	$l_7 \vee l_{10} = L_{15}$	$l_8 \vee l_{11} = L_8$	$l_9 \vee l_{12} = \Phi$	$l_{10} \vee l_{13} = L_{14}$										
$l_1 \vee l_5 = L_1$	$l_2 \vee l_6 = L_6$	$l_3 \vee l_7 = L_{11}$	$l_4 \vee l_8 = L_{16}$	$l_5 \vee l_9 = L_1$	$l_6 \vee l_{10} = L_2$	$l_7 \vee l_{11} = L_3$	$l_8 \vee l_{12} = L_4$	$l_9 \vee l_{13} = L_1$	$l_{10} \vee l_{14} = L_2$										
$l_1 \vee l_6 = L_2$	$l_2 \vee l_7 = L_7$	$l_3 \vee l_8 = L_{12}$	$l_4 \vee l_9 = L_{16}$	$l_5 \vee l_{10} = L_5$	$l_6 \vee l_{11} = L_{14}$	$l_7 \vee l_{12} = L_7$	$l_8 \vee l_{13} = L_{12}$	$l_9 \vee l_{14} = L_{11}$	$l_{10} \vee l_{15} = L_{10}$										
$l_1 \vee l_7 = L_3$	$l_2 \vee l_8 = L_8$	$l_3 \vee l_9 = L_{11}$	$l_4 \vee l_{10} = L_{15}$	$l_5 \vee l_{11} = L_9$	$l_6 \vee l_{12} = L_{10}$	$l_7 \vee l_{13} = L_7$	$l_8 \vee l_{14} = L_8$	$l_9 \vee l_{15} = L_{16}$	$l_{10} \vee l_{16} = L_6$										
$l_1 \vee l_8 = L_4$	$l_2 \vee l_9 = L_6$	$l_3 \vee l_{10} = L_{12}$	$l_4 \vee l_{11} = L_{14}$	$l_5 \vee l_{12} = L_{13}$	$l_6 \vee l_{13} = L_{14}$	$l_7 \vee l_{14} = L_{11}$	$l_8 \vee l_{15} = L_{16}$	$l_9 \vee l_{16} = L_6$	$l_{10} \vee l_{17} = L_{10}$										
$l_1 \vee l_9 = L_1$	$l_2 \vee l_{10} = L_5$	$l_3 \vee l_{11} = L_9$	$l_4 \vee l_{12} = L_{13}$	$l_5 \vee l_{13} = L_1$	$l_6 \vee l_{14} = L_2$	$l_7 \vee l_{15} = L_3$	$l_8 \vee l_{16} = L_4$	$l_9 \vee l_{17} = L_1$	$l_{10} \vee l_{18} = L_2$										
$l_1 \vee l_{10} = L_2$	$l_2 \vee l_{11} = L_8$	$l_3 \vee l_{12} = L_{10}$	$l_4 \vee l_{13} = L_{14}$	$l_5 \vee l_{14} = L_{13}$	$l_6 \vee l_{15} = L_{10}$	$l_7 \vee l_{16} = L_{15}$	$l_8 \vee l_{17} = L_8$	$l_9 \vee l_{18} = L_{16}$	$l_{10} \vee l_{19} = L_6$										
$l_1 \vee l_{11} = L_3$	$l_2 \vee l_{12} = L_7$	$l_3 \vee l_{13} = L_{12}$	$l_4 \vee l_{14} = L_{13}$	$l_5 \vee l_{15} = L_5$	$l_6 \vee l_{16} = L_6$	$l_7 \vee l_{17} = L_{15}$	$l_8 \vee l_{18} = L_{16}$	$l_9 \vee l_{19} = L_6$	$l_{10} \vee l_{20} = L_{14}$										
$l_1 \vee l_{12} = L_4$	$l_2 \vee l_{13} = L_7$	$l_3 \vee l_{14} = L_{11}$	$l_4 \vee l_{15} = L_{16}$	$l_5 \vee l_{16} = L_9$	$l_6 \vee l_{17} = L_{10}$	$l_7 \vee l_{18} = L_7$	$l_8 \vee l_{19} = L_{12}$	$l_9 \vee l_{20} = L_{11}$											
$l_1 \vee l_{13} = L_1$	$l_2 \vee l_{14} = L_8$	$l_3 \vee l_{15} = L_{10}$	$l_4 \vee l_{16} = L_{15}$	$l_5 \vee l_{17} = L_1$	$l_6 \vee l_{18} = L_2$	$l_7 \vee l_{19} = L_3$	$l_8 \vee l_{20} = L_4$												
$l_1 \vee l_{14} = L_2$	$l_2 \vee l_{15} = L_5$	$l_3 \vee l_{16} = L_9$	$l_4 \vee l_{17} = L_{15}$	$l_5 \vee l_{18} = L_9$	$l_6 \vee l_{19} = L_6$	$l_7 \vee l_{20} = L_{11}$													
$l_1 \vee l_{15} = L_3$	$l_2 \vee l_{16} = L_6$	$l_3 \vee l_{17} = L_{10}$	$l_4 \vee l_{18} = L_{16}$	$l_5 \vee l_{19} = L_{13}$	$l_6 \vee l_{20} = L_{14}$														
$l_1 \vee l_{16} = L_4$	$l_2 \vee l_{17} = L_8$	$l_3 \vee l_{18} = L_9$	$l_4 \vee l_{19} = L_{13}$	$l_5 \vee l_{20} = L_5$															
$l_1 \vee l_{17} = L_1$	$l_2 \vee l_{18} = L_7$	$l_3 \vee l_{19} = L_{12}$	$l_4 \vee l_{20} = L_{14}$																
$l_1 \vee l_{18} = L_2$	$l_2 \vee l_{19} = L_6$	$l_3 \vee l_{20} = L_{11}$																	
$l_1 \vee l_{19} = L_3$	$l_2 \vee l_{20} = L_5$																		
$l_1 \vee l_{20} = L_4$																			
$l_{11} \vee l_{12} = \Phi$	$l_{12} \vee l_{13} = L_{12}$	$l_{13} \vee l_{14} = \Phi$	$l_{14} \vee l_{15} = \Phi$	$l_{15} \vee l_{16} = \Phi$	$l_{16} \vee l_{17} = L_{15}$	$l_{17} \vee l_{18} = \Phi$	$l_{18} \vee l_{19} = \Phi$	$l_{19} \vee l_{20} = \Phi$											
$l_{11} \vee l_{13} = L_7$	$l_{12} \vee l_{14} = L_8$	$l_{13} \vee l_{15} = \Phi$	$l_{14} \vee l_{16} = \Phi$	$l_{15} \vee l_{17} = L_{10}$	$l_{16} \vee l_{18} = L_9$	$l_{17} \vee l_{19} = \Phi$	$l_{18} \vee l_{20} = \Phi$												
$l_{11} \vee l_{14} = L_{11}$	$l_{12} \vee l_{15} = L_{16}$	$l_{13} \vee l_{16} = \Phi$	$l_{14} \vee l_{17} = L_8$	$l_{15} \vee l_{18} = L_{16}$	$l_{16} \vee l_{19} = L_6$	$l_{17} \vee l_{20} = \Phi$													
$l_{11} \vee l_{15} = L_3$	$l_{12} \vee l_{16} = L_4$	$l_{13} \vee l_{17} = L_1$	$l_{14} \vee l_{18} = L_2$	$l_{15} \vee l_{19} = L_3$	$l_{16} \vee l_{20} = L_4$														
$l_{11} \vee l_{16} = L_{15}$	$l_{12} \vee l_{17} = L_8$	$l_{13} \vee l_{18} = L_7$	$l_{14} \vee l_{19} = L_{13}$	$l_{15} \vee l_{20} = L_5$															
$l_{11} \vee l_{17} = L_{15}$	$l_{12} \vee l_{18} = L_{16}$	$l_{13} \vee l_{19} = L_{12}$	$l_{14} \vee l_{20} = L_{11}$																
$l_{11} \vee l_{18} = L_7$	$l_{12} \vee l_{19} = L_{12}$	$l_{13} \vee l_{20} = L_{13}$																	
$l_{11} \vee l_{19} = L_3$	$l_{12} \vee l_{20} = L_4$																		
$l_{11} \vee l_{20} = L_{11}$																			

DOI:10.25092/baunfbed. 1596547 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 681-704, (2025)*

The role of academic self-efficacy in pre-service mathematics and science teachers' use of generative artificial intelligence tools

Caner BÖREKCİ[1,*], Nihat UYANGÖR[2]

[1] *Balıkesir University, Research Centre for IT, Cagis Campus, Balikesir.*
[2]*Balıkesir University, Necatibey Faculty of Education, Balikesir.*

Geliş Tarihi (Received Date): 05.12.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 12.05.2025

Abstract

Generative Artificial Intelligence (GenAI) has emerged as a transformative technology in recent years, fundamentally reshaping traditional pedagogical approaches and educational environments. The objective of this study was to investigate the adoption of AI tools by pre-service mathematics and science teachers in their learning processes, as well as to assess the influence of academic self-efficacy (ASE) on this adoption, framed through the Technology Acceptance Model (TAM). Specifically, this research evaluated the effect of ASE on the acceptance of AI technologies by pre-service mathematics and science teachers and their intentions to utilize these technologies in the future. Data were collected from a sample of 146 pre-service mathematics and 91 pre-service science teachers (N=237) at an educational faculty in a university located in Western Türkiye during the spring semester of 2024. The data collection employed two distinct instruments: the first instrument comprised items from the Academic Self-Efficacy Scale to assess levels of academic self-efficacy, while the second instrument included items adapted from the TAM, TAM2 (Technology Acceptance Model), and UTAUT (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology) frameworks. The results of hypothesis testing indicated that pre-service teachers with elevated levels of ASE had a more favorable perception of the usefulness and ease of use of GenAI tools, which in turn positively influenced their intention to adopt AI-based technologies. Furthermore, the study revealed that perceived usefulness and ease of use significantly shaped pre-service teachers' attitudes and behavioral intentions toward AI. When pre-service teachers recognize GenAI as a beneficial learning resource and find it user-friendly, their willingness to engage with it increases. This study posits that ASE is a critical factor in the acceptance of GenAI-based tools among pre-service mathematics and science teachers, thereby affirming the TAM as a relevant and effective model for examining pre-service teachers' potential engagement with AI in educational contexts.

[*]Caner BÖREKCİ, caner.borekci@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0001-5749-2294
Nihat UYANGÖR, nuyangor@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-4814-3866

Keywords: *Pre-service mathematics teachers, pre-service science teachers, academic self-efficacy, technology acceptance model*

Matematik ve fen bilgisi öğretmen adaylarının üretken yapay zeka araçlarını kullanmalarında akademik öz yeterliğin rolü

Öz

Üretken Yapay Zeka (ÜYZ), son yıllarda geleneksel pedagojik yaklaşımları ve eğitim ortamlarını temelden yeniden şekillendiren dönüştürücü bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmanın amacı, matematik ve fen bilgisi öğretmen adaylarının öğrenme süreçlerinde yapay zeka araçlarını benimsemelerini araştırmak ve Teknoloji Kabul Modeli (TAM) çerçevesinde akademik öz yeterliğin (AÖY) bu benimseme üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Bu araştırma AÖY'in matematik ve fen bilgisi öğretmen adayları tarafından yapay zeka teknolojilerinin kabulü ve gelecekte bu teknolojileri kullanma niyetleri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Veriler, 2024 yılı bahar döneminde Türkiye'nin batısında bir üniversitenin eğitim fakültesinde 146 matematik ve 91 fen bilgisi öğretmen adayından oluşan bir örneklemden toplanmıştır (N=237). Veri toplamada iki farklı ölçek kullanılmıştır: İlk ölçek akademik öz yeterlik düzeylerini değerlendirmek için Akademik Öz Yeterlik Ölçeği, ikinci ölçek TAM, TAM2 (Teknoloji Kabul Modeli 2) ve UTAUT (Teknoloji Kabul ve Kullanım Birleştirilmiş Modeli) çerçevelerinden uyarlanmış maddeler içermektedir. Hipotez testinin sonuçları, yüksek düzeyde AÖY'e sahip öğretmen adaylarının ÜYZ araçlarının kullanışlılığı ve kullanım kolaylığı konusunda daha olumlu bir algıya sahip olduklarını ve bunun da YZ tabanlı teknolojileri benimseme niyetlerini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, çalışma, algılanan yararlılık ve kullanım kolaylığının öğretmen adaylarının ÜYZ'ye yönelik tutumlarını ve davranışsal niyetlerini önemli ölçüde şekillendirdiğini ortaya koymuştur. Öğretmen adayları ÜYZ'yi faydalı bir öğrenme kaynağı olarak gördüklerinde ve kullanıcı dostu bulduklarında, onunla etkileşim kurma istekleri artmaktadır. Bu çalışma, ASE'nin matematik ve fen bilgisi öğretmen adayları arasında ÜYZ tabanlı araçların kabulünde kritik bir faktör olduğunu ve böylece TAM'ın öğretmen adaylarının eğitim bağlamlarında ÜYZ ile potansiyel etkileşimlerini incelemek için uygun ve etkili bir model olduğunu doğrulamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Matematik öğretmen adayları, fen bilgisi öğretmen adayları, akademik öz-yeterlik, teknoloji kabul modeli*

1. Introduction

Generative Artificial Intelligence (GenAI) has become a revolutionary technology in recent years, significantly altering traditional teaching methods and learning environments [1]. Incorporating GenAI into education has reshaped and transformed the strategies educators employ in various ways, including personalizing learning experiences, boosting student engagement, and improving assessment and feedback processes [2]. This paradigm shift requires pre-service teachers to be able to effectively integrate and use GenAI technologies efficiently. Pre-service teachers must stay informed about Generative AI (GenAI) as it is revolutionizing traditional teaching

methods by personalizing learning, enhancing student engagement, and improving assessment practices [3]. As future educators, they need to incorporate AI-driven strategies from the outset to effectively navigate contemporary classrooms. Unlike in-service teachers who may need retraining, pre-service teachers can seamlessly integrate GenAI as a fundamental component of their pedagogy [4]. Academic self-efficacy is crucial for pre-service teachers in effectively adopting and utilizing novel technologies, including GenAI, as their confidence significantly impacts acceptance and use [5, 6]. Moreover, Zee and Koomen [7] emphasize that teachers' self-efficacy plays a vital role in shaping classroom dynamics, fostering student academic adjustment, and promoting teacher well-being, highlighting the importance of understanding how these beliefs influence various aspects of teaching. In this context, the Technology Acceptance Model (TAM) provides a theoretical framework for examining this phenomenon, positing that perceived ease of use and perceived usefulness of technology influence users' acceptance and engagement levels [8]. The acceptance and effective use of GenAI tools in education can enhance learning outcomes for both students and educators, making TAM particularly relevant in the GenAI-in-education context. Therefore, examining the impact of academic self-efficacy on GenAI engagement using the lens of TAM can significantly improve our comprehension of technology adoption in educational environments.

TAM is a theoretical framework developed by Davis [8] that elucidates how users come to accept and utilize technology. It posits that two primary factors influence an individual's decision to adopt a technology: Perceived Usefulness (PU) and Perceived Ease of Use (PEU). Perceived Usefulness refers to the degree to which a person believes that using a technology will enhance their performance, while Perceived Ease of Use indicates how effortless they find the technology to operate [8]. These perceptions subsequently influence an individual's attitude toward using the technology, which in turn shapes their behavioral intention and actual usage. Over time, TAM has evolved through modifications such as TAM2 and the UTAUT to incorporate additional variables, including subjective norms and facilitating conditions [9, 10].

TAM is widely utilized in educational technology research to investigate the factors that influence the adoption of emerging digital tools, including GenAI. In the context of teacher education, TAM aids in understanding how pre-service teachers perceive and adopt AI-based tools for learning and instruction. This model is particularly valuable as it identifies cognitive and psychological determinants that impact the willingness to integrate technology into educational practices [11]. By applying TAM, researchers can analyze the barriers and facilitators that shape teachers' attitudes toward AI-driven learning platforms, intelligent tutoring systems, and automated feedback mechanisms.

In this study, the TAM serves as a robust framework for examining the impact of self-efficacy on technology adoption. Academic self-efficacy—the belief in one's capability to successfully complete academic tasks—significantly influences perceptions of both the usefulness and ease of use of GenAI tools. Pre-service teachers with high levels of self-efficacy are likely to feel more confident in experimenting with AI-based applications, viewing them as valuable resources that enhance their teaching and learning effectiveness [12,13].

1.1. Using generative artificial ıntelligence for science and mathematics pre-service teachers

GenAI refers to a category of artificial intelligence models specifically designed to create new content, including text, images, audio, and video, by identifying patterns learned

from extensive datasets. Unlike traditional AI systems that primarily focus on classification or decision-making, GenAI produces original outputs, making it highly versatile across various domains. GenAI is a subset of artificial intelligence that generates new content by learning patterns from large datasets. It utilizes deep learning architectures, particularly transformers, generative adversarial networks (GANs), variational autoencoders (VAEs), and diffusion models, to produce human-like text, images, audio, and code [2]. The process involves training on vast datasets, recognizing patterns, and generating outputs based on learned structures. Continuous refinement through techniques such as reinforcement learning ensures improved accuracy and coherence. GenAI can be categorized into several types based on its functionality and application. Text-based GenAI models, such as GPT-4 and BERT, generate human-like text and are widely used in chatbots, content creation, and language processing. Image-based GenAI, including DALL·E and Stable Diffusion, produces high-quality images from textual prompts, revolutionizing digital art and graphic design. Audio-based GenAI, exemplified by Jukebox and ElevenLabs, generates speech and music, facilitating advancements in voice synthesis and entertainment. Video-based GenAI, such as Runway Gen-2, creates and enhances video content, supporting applications in film production and media. Code-based GenAI, like GitHub Copilot, assists programmers by generating and debugging code, thereby improving software development efficiency. Lastly, 3D and design GenAI, represented by tools like NVIDIA Omniverse, enables the creation of 3D models and deepfake content, transforming industries such as gaming and virtual reality. GenAI has significant applications across education, healthcare, finance, and creative industries, reshaping traditional workflows through automation and personalization.

Integrating innovative technologies, such as GenAI, into the preparation of pre-service science and mathematics teachers is becoming essential. These tools offer substantial potential for revolutionizing teaching approaches and enhancing student learning [14]. GenAI can assist future teachers in completing their tasks more accurately. For instance, pre-service teachers can benefit from guidance and feedback to improve their writing style, grammar, and sentence structure [15]. Strong writing skills are essential for pre-service teachers to deliver clear instruction, communicate professionally, and provide meaningful feedback to students. GenAI can enhance their writing by refining grammar, structure, and clarity. These skills are essential for developing lesson plans, explaining complex concepts, providing feedback, publishing research, and engaging in professional communication. AI tools support pre-service teachers by enhancing the clarity and precision of their writing, thereby boosting teaching effectiveness and student learning outcomes. Additionally, these tools can personalize learning experiences for pre-service teachers, taking into account the diverse comprehension levels among students [16].

GenAI can assist future teachers in crafting innovative lesson plans and teaching materials [17]. AI-driven tools can generate a variety of examples, problems, and scenarios, allowing teachers to address diverse learning styles and needs [18,19]. These technologies can also support project-based and inquiry-based learning by providing real-time feedback and guidance, encouraging students to engage in deeper learning and critical thinking [20]. Additionally, AI can offer instant and detailed feedback on student performance, helping teachers identify where students struggle and need extra help. This leads to more effective and timely support [21]. Automated assessment tools can also reduce the time teachers spend on administrative tasks, giving them more time to focus on teaching and professional growth [22].

GenAI also promotes collaborative learning by facilitating communication and teamwork among pre-service teachers. AI-driven platforms accomplish this by analyzing pre-service teachers' learning styles, progress, and competencies to pair them with peers for effective peer tutoring, collaborative group projects, and structured discussions. These adaptive learning systems ensure that pre-service teachers work with partners whose strengths complement their learning needs, fostering a more dynamic and personalized educational experience [23]. Additionally, these technologies empower future educators to connect with experienced mentors and educators from around the globe. Through AI-powered professional learning networks, pre-service teachers can participate in virtual mentoring, attend interactive workshops, and receive personalized guidance tailored to their teaching preferences and career aspirations. This exposure enables them to benefit from a variety of teaching methodologies and best practices, thereby enhancing their professional development [24]. Furthermore, becoming familiar with advanced technologies prepares future educators for contemporary classrooms, where AI and other digital tools will play a crucial role in teaching and learning. By incorporating AI into lesson planning, student assessment, and classroom management, pre-service teachers gain practical experience in utilizing technology to enhance student engagement and improve learning outcomes. This ensures that they are well-equipped to integrate these tools effectively into their teaching practices [25]. Finally, understanding and utilizing AI in education positions teachers as leaders in educational innovation. Educators who actively engage with AI technologies can drive curriculum advancements, develop data-driven teaching strategies, and contribute to institutional digital transformation. This adaptability allows them to remain at the forefront of technological advancements and shape the future of education [26].

When examining literature, several studies indicate that the use of Generative Artificial Intelligence (GenAI) is associated with the academic self-efficacy of pre-service teachers, as well as its educational applications. The relationship between academic self-efficacy and GenAI usage is well-established within the frameworks of educational psychology and technology acceptance theory. Academic self-efficacy, defined as individuals' beliefs in their ability to successfully perform academic tasks, significantly influences pre-service teachers' willingness to engage with new and complex technologies [12]. In the context of the Technology Acceptance Model (TAM), perceived ease of use and perceived usefulness are the primary determinants of technology adoption [8]. Self-efficacy enhances these perceptions, enabling confident users to view GenAI tools as valuable resources for learning, lesson planning, assessment, and content creation [41]. Consequently, pre-service teachers with higher levels of academic self-efficacy are more likely to proactively engage with GenAI and utilize its features to enhance their teaching practices and academic outcomes [80, 81]. This relationship is crucial for two main reasons. First, it promotes equitable access: students with low self-efficacy may avoid GenAI tools due to fear of failure or misuse, potentially exacerbating existing inequalities in digital literacy and academic achievement. Second, high self-efficacy fosters deeper, more purposeful engagement with GenAI, supporting self-regulated learning and the development of professional identity [86]. Therefore, fostering academic self-efficacy among pre-service teachers is essential not only for their academic performance but also for preparing them to integrate GenAI into their future teaching practices in a meaningful and ethical manner. As educational systems evolve, the integration of GenAI should be viewed not merely as a technological enhancement but as a catalyst for reimagining pedagogy to foster deeper learning and enhance students' academic agency.

1.2. Academic self-efficacy of science and mathematics pre-service teachers

According to Bandura's social cognitive theory, self-efficacy refers to an individual's belief in their ability to accomplish specific tasks [27]. Academic self-efficacy is a component of overall self-efficacy and a fundamental concept related to an individual's belief in their capacity to perform academic tasks effectively, achieve academic goals, and succeed in educational pursuits [28,29]. It encompasses individuals' confidence and perception of their academic abilities, their capacity to organize and carry out actions to attain desired levels of academic performance, and their assessments of their ability to excel in assignments, courses, or academic activities [30-33].

For pre-service teachers, self-efficacy significantly influences their teaching skills and practices [34]. Research by Burak [35] and Sultan et al. [36] has demonstrated the impact of self-efficacy beliefs on pre-service teachers' career choices and teaching abilities. When pre-service teachers lack self-efficacy in specific areas, such as science education, they may hesitate to engage in teaching practices related to these subjects, affecting their overall teaching skills and confidence in the classroom [37]. Studies by Velthuis et al. [38] and Slater and Main [39] further underscore the importance of self-efficacy in domains such as science teaching and classroom management. Self-efficacy influences pre-service teachers' willingness to engage in teaching actions and their ability to persevere through challenges. Pre-service teachers with higher self-efficacy in areas such as science teaching or classroom management are more likely to exhibit practical teaching skills and strategies in these domains.

Moreover, pre-service teachers' academic self-efficacy pertains explicitly to their confidence in effectively integrating technology into their teaching practices [40]. To comprehend the impact of pre-service teachers' academic self-efficacy on their technology usage, it is crucial to analyze the relationship between their confidence in academic tasks and their ability to utilize technology in educational settings effectively. Research by Holden and Rada [41] emphasizes the influence of perceived usability and technology self-efficacy on teachers' technology acceptance, highlighting individual differences and situational characteristics, including self-efficacy, in teachers' technology acceptance and use. Similarly, Pendergast et al. [42] offer insights into pre-service student-teacher self-efficacy beliefs, shedding light on foundational aspects of teachers' development, including their confidence in utilizing technology. Furthermore, Caner and Aydın [43] revealed a strong positive correlation between pre-service teachers' self-efficacy and technology integration tendencies. This suggests that higher levels of self-efficacy are associated with a greater inclination towards using technology. Keser et al. [44] compared pre-service teachers' TPACK competencies with their self-efficacy perceptions towards technology integration, emphasizing the correlation between these factors. These studies suggest that pre-service teachers' academic self-efficacy significantly influences their attitudes and behaviors towards technology usage in educational settings.

1.3. Research questions

The relationship between pre-service teacher's academic self-efficacy levels and GenAI engagement may provide valuable information for teacher educators and practitioners. Since integrating new technologies into educational settings may require a basic level of academic self-efficacy, it is important to explore the potential influence of academic self-efficacy on the acceptance and use of GenAI among pre-service teachers. This study aims to offer essential insights into integrating AI in education to develop new approaches in the training of pre-service teachers. The relationship between pre-service teachers'

academic self-efficacy and their level of acceptance of artificial intelligence tools was examined in the current study. A model was developed based on literature review.

RQ1: How does academic self-efficacy influence the acceptance and use of artificial intelligence tools among mathematics and science pre-service teachers?

RQ2: What insights can the relationship between academic self-efficacy and AI tool acceptance provide for developing effective AI integration strategies in teacher education programs?

2. Method

This study is a correlational survey, a type of descriptive research that aims to identify the relationships between variables as they exist. Correlational survey models aim to determine the existence or degree of correlation between two or more variables [45]. This study investigates the relationship between pre-service teachers' academic self-efficacy and their level of acceptance of artificial intelligence tools.

2.1. Proposed research model and hypotheses

In the proposed model, academic self-efficacy is addressed with three sub-dimensions. these are (1) ability to cope with academic problems, (2) academic effort and (3) academic planning. Pre-service teachers' ability to cope with academic problems significantly shapes their perception of technology's usefulness. Research demonstrates that individuals with high self-efficacy in problem-solving are more inclined to view new technologies as effective tools for addressing academic challenges [12, 46]. The confidence to overcome difficulties makes these students more receptive to technology's practical benefits in educational contexts. Liaw and Huang [46] found that students who are competent problem-solvers tend to report higher levels of perceived usefulness when engaging with e-learning platforms, underscoring the value of self-efficacy in promoting positive technology acceptance.

Similarly, academic effort influences the perceived usefulness of technology. Students who invest substantial effort in their academic work are more likely to appreciate the potential of AI and other technologies in streamlining learning processes [47, 48]. This sustained engagement with academic tasks fosters a mindset that values the utility of technological tools in managing workloads and achieving academic goals. Chemers et al. [47] found that students with strong academic self-efficacy were more proactive in engaging with resources, which shaped their perception of technology as a valuable learning aid.

In addition, academic planning plays a crucial role in shaping pre-service teachers' perceptions of how easy new technologies are to use. Planning skills enable students to organize their tasks efficiently, reducing the cognitive load associated with learning how to use new tools [49]. As a result, students with strong academic planning abilities are more likely to experience technology as intuitive and accessible. Zimmerman and Schunk [49] argued that well-planned learners adapt more quickly to technological environments, leading to a smoother and more positive user experience.

Once students perceive technology as useful and easy to use, these perceptions significantly influence their attitudes towards technology usage. According to the Technology Acceptance Model [8], perceived usefulness (PU) and perceived ease of use (PEU) are vital predictors of positive attitudes towards adopting new systems. Venkatesh and Davis [9] emphasized that when students recognize both the value and simplicity of

technology, they are more likely to develop favorable attitudes towards its use in education. This alignment between usability and usefulness is essential for fostering a mindset that embraces innovation.

Finally, attitudes towards technology usage directly impact pre-service teachers' behavioral intention to use such tools. Ajzen [50] and Park et al., [52] posits that positive attitudes are potent motivators that translating into concrete behavioral intentions. Pre-service teachers with favorable views towards AI and digital tools are more likely to incorporate these technologies into their teaching practices. Venkatesh and Davis [9] confirmed that attitudes play a crucial role in predicting whether individuals will continue to use technology in their professional environments, highlighting the importance of fostering positive perceptions early in teacher education programs.

These interconnected factors illustrate how academic self-efficacy and key components of the technology acceptance model work together to influence technology adoption (see Figure 1). Devel oping self-efficacy through problem-solving, effort, and planning can enhance pre-service teachers' perceptions of technology, encouraging them to adopt new tools more confidently and effectively in their academic and professional lives. Below are the generated hypotheses indicating that higher academic self-efficacy level of pre-service teachers has a positive impact on the acceptance of AI technology:

- H1: Cope with academic problems (ASE1) positively affects perceived usefulness (PU).
- H2: Academic effort (ASE2) positively affects perceived usefulness. (PU).
- H3: Academic planning (ASE3) positively affects perceived ease of use (PEU).
- H4: Perceived ease of use (PEU) positively affects perceived usefulness. (PU).
- H5: Perceived usefulness. (PU). positively affects attitude towards use (ATU).
- H6: Perceived ease of use (PEU) positively affects attitude towards use (ATU).
- H7: Attitude towards use (ATU) positively affects Behavioural intention to use (BIU).

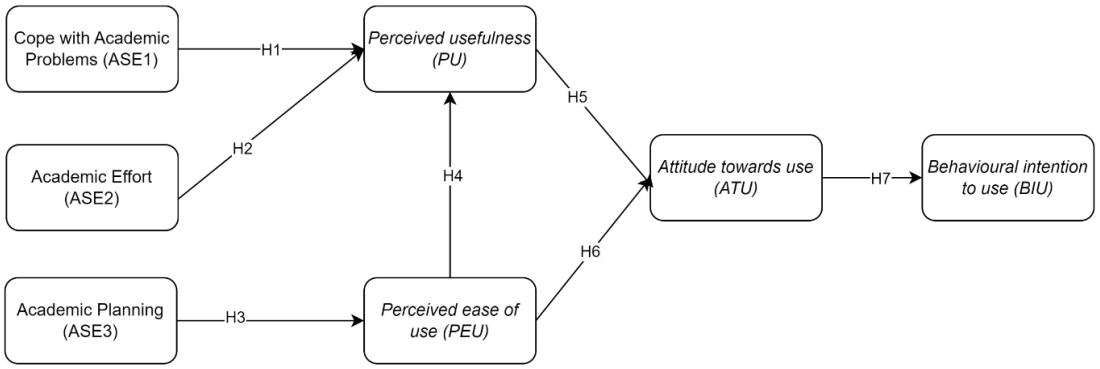


Figure 1. Academic self-efficacy and technology acceptance model (TAM) integration

2.2. Data collection tools

Data collection for this study involved two distinct forms. The first form utilized was the Academic Self-Efficacy Scale, developed by Kandemir [53], to measure pre-service teachers' academic self-efficacy levels. This scale comprises 19 items across three sub-

dimensions: coping with academic problems (11 items), academic effort (4 items), and academic planning (4 items). The scale's internal consistency was confirmed with Cronbach's alpha coefficients of .90 for the first factor, .78 for the second, .77 for the third, and .92 for the total scale. Kandemir [53] reported fit indices for the scale as χ^2/sd = 3.74, RMSEA = .077, NFI = .96, CFI = .97, GFI = .89, AGFI = .86, and RMR = 0.056. In the present study, alpha coefficients were found .84, .81, .78 and .91, respectively, and the the fit indices were found to be χ^2/sd = 2.89, RMSEA = .087, CFI = .97, TLI = .94, and SRMR = .079 in CFA.

The second form includes items adapted from the TAM, TAM2 and UTAUT studies conducted by Venkatesh and Davis [9,54] and Venkatesh et al. [10] This scale comprises 15 items across four sub-dimensions: perceived usefulness (4 items), perceived ease of use (5 items), attitude towards use (2 items) and behavioural intention to use (3 items). In the present study the scale's internal consistency was confirmed with Cronbach's alpha coefficients of .88 for the perceived usefulness, .88 for the perceived ease of use, .87 for the third, and .92 for the total scale. The fit indices were found to be χ^2/sd = 2.64, RMSEA = .085, CFI = .96, TLI = .95, and SRMR = .078 in CFA.

2.3. Participants and data collection

The target group of the study comprised pre-service science (n = 91) and mathematics (n = 146) teachers (N = 237) enrolled at a university in western Turkey. Among the pre-service teachers, 169 were female and 68 were male. The participants were categorized by grade level, with 70 freshmen, 65 sophomores, 34 juniors, and 68 seniors. The data collection process followed a carefully structured protocol designed to ensure reliability and validity of results. Initially, a pilot test was conducted with a small subset of participants (n = 15) to assess the clarity of instrument items, estimate completion time, and identify potential procedural issues. Based on pilot test feedback, minor adjustments were made to the wording of several questionnaire items to improve comprehension. Two standardized instruments were administered in sequence. Both instruments utilized a 5-point Likert scale where participants selected from the following options: "(1) It does not reflect me at all, (2) It reflects me very little, (3) It reflects me a little, (4) It reflects me mostly, (5) It reflects me completely."

To minimize potential response bias, the questionnaires were administered by research assistants who were not associated with teaching the courses. Participants completed the surveys independently without discussion among peers. The research assistants remained available to clarify any questions about the procedure but were instructed not to provide interpretations of questionnaire items. Demographic information including gender, academic major, and year of study was collected on a separate form that was coded to maintain participant anonymity while allowing for demographic analysis. The response rate was 92%, with 257 surveys distributed and 237 valid surveys returned. Incomplete surveys (n = 11) and those with uniform response patterns indicating potential non-engagement (n = 9) were excluded from the final analysis. All data collection procedures were reviewed and approved by the university's Institutional Review Board (E.371663) prior to implementation.

2.4. Data analysis

Questionnaires were distributed to over 314 pre-service teachers, and 297 responses were received. After eliminating pre-service teachers who indicated that they did not use artificial intelligence technologies, as well as non-responders and incomplete responses, the data from 237 participants were deemed suitable for analysis. The proposed conceptual model was evaluated using structural equation modeling (SEM), and the

structural model was analyzed with R software. SEM is a robust statistical technique widely employed to examine the relationships between observed and latent variables. Utilized across various scientific disciplines, SEM provides a comprehensive framework for testing and validating significant theories, particularly in evaluating relationships between variables and constructing and assessing structural models [55].

The study examined the relations between academic self-efficacy and technology acceptance and use among pre-service teachers through five steps. (1) Descriptive statistics, including mean, standard deviation, mode, median, skewness, and kurtosis, were computed for the variables. (2) The data's normality was assessed to confirm it met the necessary assumptions, and common method bias was also evaluated. Harman's single-factor test was employed to check for common method variance, as the data was collected through self-reports and two scales were administered at the same time [56]. (3) The fit of the measurement model to the actual data was evaluated. (4) Correlation coefficients were calculated to determine the strength of relationships. (5) Theoretical models derived from the literature were tested, with structural equation modeling (SEM) being the preferred method. SEM is a collection of statistical techniques used to analyze the relationships between one or more independent variables and one or more dependent variables [57]. It facilitates multiple regression analyses among factors, examining relationships between measured variables, such as academic self-efficacy and technology acceptance.

3. Findings and discussion

The study utilized two different scales to gather information on students' academic self-efficacy, and technology acceptance. Table 1 shows the descriptive statistics of the variables analyzed in the study. The academic self-efficacy scale consists of three sub-dimensions (coping with academic problems, academic effort, and academic planning), and technology acceptance consists of four sub-dimensions (perceived usefulness, perceived ease of use, attitude towards use, behavioural intention to use). The table presents an analysis of mean, standard deviation, mode, median, Zskewness, and Zkurtosis values. The Z-scores for kurtosis and skewness of the variables were all within the range of -1.96 to 1.96, which suggests that the normality assumption was met [58].

Table 1. Descriptive Statistics

	Mean	Sd	Mode	Median	$Z_{kurtosis}$	$Z_{skewness}$
Coping with academic problems (ASE1)	3.27	0.521	3.17	3.25	1.11	0.24
Academic effort (ASE 2)	3.8	0.601	3.75	3.75	-1.84	2.32
Academic planning (ASE3)	3.51	0.598	3.25	3.5	-0.48	-0.16
Perceived ease of use (PEU)	3.56	0.709	3.4	3.6	-0.59	0.18
Perceived usefulness (PU)	4.04	0.63	4	4	-1.05	1.12
Attitude towards use (ATU)	3.51	0.741	4	3.67	-1.53	0.71
Behavioural ,ntetion to use (BIU)	3.98	0.696	4	4	-1.85	1.81

Furthermore, Harman's single-factor test was conducted to examine the presence of common method bias, and the threshold value was determined to be .305. The calculated

threshold value, which is less than 0.5, indicates that there is no common method bias [59].

Structural equation modeling (SEM) is a statistical approach for evaluating the fit of both measurement models and constructed models. SEM relies on essential assumptions, such as normality, linearity, multicollinearity, multivariance, sample size, and outlier detection [60]. Failure to meet these assumptions can introduce errors in examining the relationships between observed and latent variables. To ensure valid confirmatory factor analysis, these assumptions must be satisfied beforehand. Therefore, the dataset was evaluated for univariate and multivariate normality, along with outliers. Univariate normality and outliers were checked using kurtosis, skewness values, and standardized z-scores, while multivariate normality and outliers were assessed through Mahalanobis distance and residuals. No outliers were found in the dataset. Table 1 presents the descriptive statistics for each variable, used to verify univariate normality. For multivariate normality, Mardia's coefficients for skewness and kurtosis, along with their p-values, were calculated. Mardia's test evaluates if a set of variables aligns with a multivariate normal distribution [61]. The results, with skewness ($\gamma 1p = 3.24$, $p = 0.256$) and kurtosis ($\gamma 2p = 7.41$, $p = 0.287$), confirm that the data meets the multivariate normality assumption. The multicollinearity assumption was examined using variance inflation factor (VIF) and tolerance values as Tabachnick et al. [62] outlined. Results showed VIF and tolerance values within acceptable limits (Academic Self-efficacy: VIF = 1.89, tolerance = .89; Technology Acceptance VIF = 1.92, tolerance = .88), indicating no multicollinearity issues since VIF was below 10 and tolerance exceeded .10.

Reliability and validity metrics were calculated to evaluate the conceptual model proposed in this study. The internal consistency and item reliability of each construct were assessed using Cronbach's α, composite reliability (CR), and average variance extracted (AVE) (Annex 1). Recommended thresholds for these values are 0.7 for Cronbach's α and CR and 0.5 for AVE [63, 64]. Results in Annex 1 indicate strong reliability and internal consistency, with Cronbach's α exceeding 0.7 [65]. CR values above 0.7 also confirmed sufficient internal consistency across constructs. Convergent validity was supported by factor loadings for each construct, with AVE values surpassing 0.5 [66, 63].

Discriminant validity was established by comparing the square roots of AVE values with the correlations shown in Table 2, where square roots of AVE values were higher than the corresponding correlations. This finding is consistent with discriminant validity standards outlined by Hair et al. [63].

In the measurement model, sub-dimensions of the scales were treated as observed variables, while academic self-efficacy and technology acceptance served as latent variables. Figure 2 illustrates the measurement model with seven observed variables and two latent variables with standardized factor loadings. Model fit indices showed a chi-square to degrees of freedom ratio of $X^2/df = 1.47$ ($X^2 = 19.2$, $df = 13$, $p = .118$), with RMSEA = .044 (90% CI: .001 - 0.084), CFI = .991, and TLI = .986, all indicating a well-fitting model [55, 67].

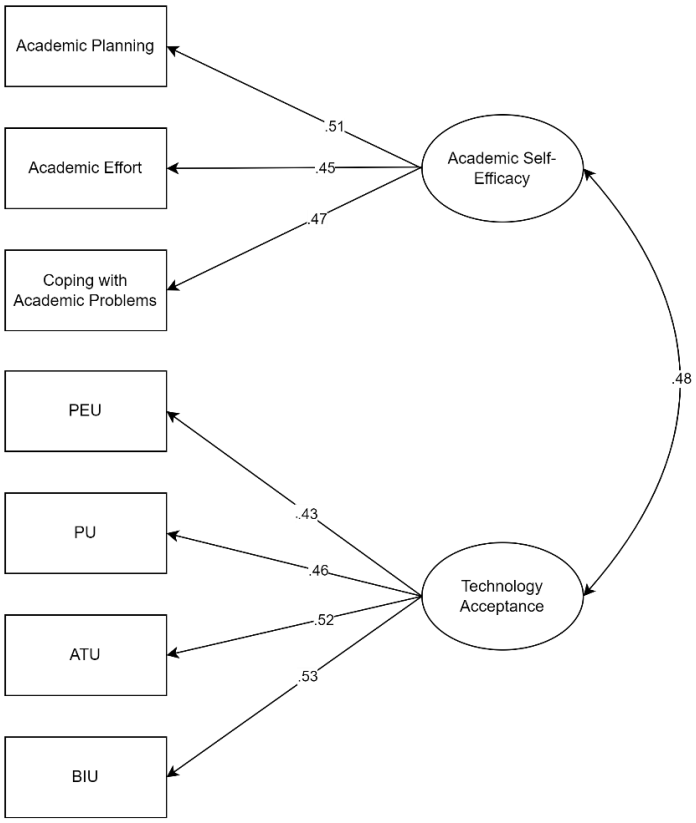


Figure 2. Measurement model

The correlation matrix (Table 2) reveals meaningful relationships between self-efficacy sub-dimensions (academic planning, academic effort, and coping with academic problems) and technology acceptance components (perceived usefulness, perceived ease of use, attitude towards use, and behavioral intention to use). Strong correlations were observed among the self-efficacy dimensions, suggesting that students who excel in one area of self-efficacy, such as academic planning, are likely to demonstrate strength in related areas like effort and coping skills. Within the technology acceptance dimensions, a moderately strong relationship was noted between perceived usefulness and perceived ease of use and between attitude towards technology use and behavioral intention to use, highlighting the link between positive perceptions of technology and the likelihood of intending to use it.

Regarding cross-dimension relationships, the analysis shows that self-efficacy dimensions are weakly to moderately correlated with technology acceptance factors. For instance, students who demonstrate high academic effort and effective coping strategies may also be slightly more inclined to see technology as useful or easy to use and, thus, may be more likely to adopt it. However, these correlations are relatively lower, indicating that self-efficacy contributes to technology acceptance but not as strongly as internal relationships within each category.

Overall, the analysis suggests that both academic self-efficacy and positive perceptions of technology play roles in fostering an intention to use technology, but the influence of self-efficacy on technology acceptance appears to be more limited.

Table 2. Correlations and square roots of AVE scores

Factor	ASE1	ASE2	ASE3	PU	PEU	ATU	BIU
Coping with academic problems (ASE1)	(.71)						
Academic effort (ASE2)	0.68***	(.72)					
Academic planning (ASE3)	0.77***	0.65***	(.72)				
Perceived Usefulness (PU)	0.36***	0.30***	0.29***	(.87)			
Perceived Ease of Use (PEU)	0.31***	0.23***	0.28***	0.47***	(.80)		
Attitude Towards Use (ATU)	0.36***	0.21**	0.28***	0.45***	0.45***	(.73)	
Behavioral Intention to Use (BIU)	0.31***	0.29***	0.22***	0.54***	0.49***	0.56***	(.91)

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

The literature on academic self-efficacy and technology acceptance aligns closely with the findings in the correlation matrix, which reveals significant relationships between self-efficacy sub-dimensions (academic planning, effort, and coping with academic problems) and components of technology acceptance (perceived usefulness, perceived ease of use, attitude towards use, and behavioral intention to use). As established by Bandura and Zimmerman [68] and Chemers et al. [47], academic self-efficacy influences students' engagement and motivation, which, in turn, can positively affect how they perceive and intend to use educational technologies. The matrix's strong internal correlations among self-efficacy dimensions support this, suggesting that students confident in planning their studies are likely to excel in related self-efficacy areas, such as academic effort and coping abilities [48]. This mirrors the findings by Holden and Rada [41], who argued that high self-efficacy enhances openness to technology.

Within the technology acceptance model (TAM) framework, as proposed by Davis [8], perceived usefulness and ease of use are core to technology adoption. The matrix reflects this with a moderate correlation between perceived usefulness and ease of use and a notable connection between attitude toward use and behavioral intention to use—similar to the relationship highlighted in TAM literature, including Venkatesh and Bala [51]. Students who view technology as applicable are more likely to have a favorable attitude towards it and, thus, a stronger intention to use it, indicating that positive perceptions of technology play a significant role in its adoption.

The cross-dimension correlations between self-efficacy and technology acceptance factors in the matrix are relatively weaker, yet they suggest that students with high self-efficacy in academic effort or coping may perceive GenAI tools as slightly more useful or accessible, aligning with Pan's [69] findings on the influence of self-efficacy on perceived usefulness. However, the modest strength of these correlations implies that while self-efficacy can enhance technology acceptance, its impact is secondary to internal relationships within each domain. This aligns with Yulian et al. [70], who found that although self-efficacy contributes to technology use intention, it is not the primary driver. Overall, the analysis suggests that academic self-efficacy and positive technology perceptions both play essential, though somewhat distinct, roles in fostering the intention to use GenAI in educational contexts.

The SEM approach statistically analyzed the research model's path coefficients and tested for significance. The fit indices of the model $X^2/df = 4.04$ ($X^2 = 1964$, $df = 485$, $p < .001$), RMSEA = .114 with 95% CI [.108 ~.119], CFI = .963, and TLI= .960 respectively. Regarding parameter values, the fit measures were within acceptable limits [55, 67]. When Figure 3 displays regression coefficients and explained variances, it indicates that 28% of the variance accounts for the behavioral intention to use AI tools. Additionally, the model's PU, PEU and ATU structures are explained by variances of 60%, 87%, and 28%, respectively.

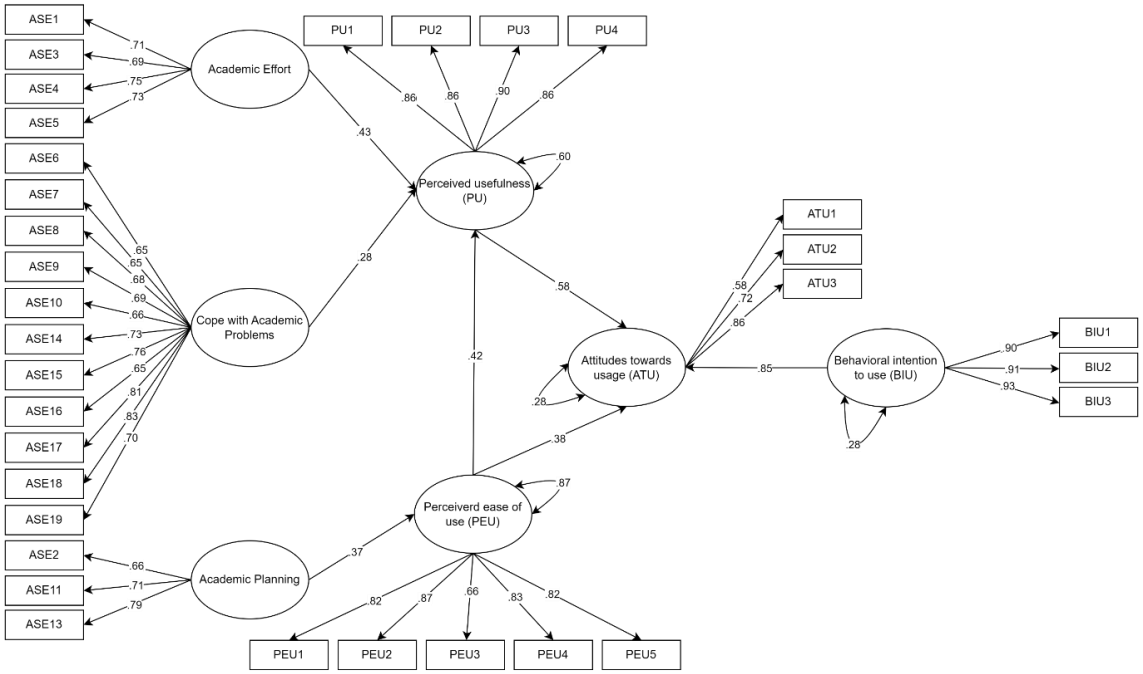


Figure 3. Structural equation modelling of the hypotheses

The data presented in Table 3 indicates a notable positive correlation among these variables. All proposed hypotheses were validated within the model.

Table 3. Hypothesis test results

Structural relations of the proposed model	β	z	p-value	Decision
H1. ASE1 → PU	.28	2.43	.015	Accepted
H2. ASE2 → PU	.43	5.35	.025	Accepted
H3. ASE3 → PEU	.37	7.53	<.001	Accepted
H4. PEU → PU	.42	7.28	<.001	Accepted
H5: PU →ATU	.38	4.81	< .001	Accepted
H6: PEU → ATU	.58	5.60	< .001	Accepted
H7: ATU → BIU	.85	6.51	< .001	Accepted

This self-efficacy and technology acceptance model for Generative AI (GenAI) highlights how individual attitudes and perceptions influence behavioral intentions to adopt GenAI tools. Self-efficacy components such as Academic Effort, Coping with Academic Problems, and Academic Planning are shown to impact perceived ease of use (PEU) and perceived usefulness (PU), which, in turn, affect attitudes towards usage (ATU) and the ultimate behavioral intention to use (BIU) the technology. The model is statistically

significant in all structural relationships, suggesting a robust interdependence between these factors. Five key topics have emerged when the results obtained from the model are analyzed in light of the existing literature. These topics are the role of self-efficacy in technology acceptance, adaptation of the Technology Acceptance Model (TAM) for Generative AI (GenAI), perceived usefulness and behavioral intention in GenAI usage, attitudes toward GenAI and adoption behavior, and the relationship between behavioral intention and actual use.

Self-efficacy is critical in technology acceptance, as it directly influences users' confidence in their ability to use new technology effectively. In a foundational study, Bandura [12] demonstrated that self-efficacy affects behavior through efficacy expectations and outcome expectations. This aligns with the model's emphasis on "Academic Effort" and "Coping with Academic Problems" in influencing GenAI acceptance. Research by Budu et al. [71] further reinforces this by showing that both academic and technology-specific self-efficacy significantly contribute to technology acceptance in higher education. Al Kurdi et al. [72] further explore these relationships, developing a model for e-learning technology acceptance that emphasizes the importance of both self-efficacy and social influence in students' perceived ease of use and perceived usefulness of technology, underscoring the broader relevance of self-efficacy across digital learning contexts.

The Technology Acceptance Model (TAM) is frequently adapted to fit specific technological contexts. Davis [8] identified Perceived Usefulness (PU) and Perceived Ease of Use (PEU) as critical predictors of attitudes toward using new technology. The current model adapts TAM constructs to analyze how academic self-efficacy impacts perceptions of GenAI's usefulness and ease of use, ultimately shaping attitudes and intentions toward usage. The research by Al-Adwan et al. [73] on extending TAM to metaverse-based platforms illustrates a similar adaptation, emphasizing that self-efficacy enhances students' perceptions of ease and usefulness for cutting-edge technologies. This suggests that as students become more confident in their abilities, they are more likely to adopt complex technologies like GenAI.

Perceived usefulness is a well-documented predictor of behavioral intentions to use technology, as evidenced by Venkatesh and Bala [51]. The current model links PU directly to BIU, suggesting that students who recognize the academic benefits of GenAI are more likely to incorporate it into their learning activities. This aligns with insights from Latip et al. [74], who found that self-efficacy moderates the acceptance of e-learning platforms, with higher self-efficacy correlating with greater acceptance and intention to use technology. For GenAI, this indicates that perceived utility, supported by self-efficacy, enhances pre-service teachers' intentions to integrate it into their academic work.

Positive attitudes toward technology (ATU) are frequently linked to increased behavioral intentions to adopt, as shown by Fishbein and Ajzen [75]. The current model captures ATU as a factor shaped by both PU and PEU, aligning with the broader body of research on technology adoption. The study by Yanto et al. [76] discusses how perceived ease of use (PEU) and perceived usefulness (PU) significantly influence students' attitudes toward using virtual laboratories, aligning with the broader research on technology adoption. It highlights that PU mediates the relationship between PEU and attitudes, reinforcing the importance of both factors in technology acceptance models. Another research by Jang et al. [77] illustrates how perceived usefulness (PU) and perceived ease of use (PEU) significantly influence attitudes toward technology use (ATU) in the context

of integrating AR and VR in education. The study's findings underscore the importance of these factors in shaping teachers' willingness to adopt new technologies, aligning with broader research on technology adoption. In the context of GenAI, positive attitudes fostered by high self-efficacy and perceived ease of use can lead to broader adoption of these tools in academic environments.

Research has consistently demonstrated that behavioral intention (BIU) strongly predicts actual technology usage [50, 53, 78]. Current model aligns with these findings by positing that when students perceive GenAI as valuable and user-friendly, they are more likely to express a strong intention to use it, which translates to increased usage in academic contexts. This is further supported by the study of Al Kurdi et al. [72], which emphasizes the role of behavioral intention as a determinant of actual e-learning technology usage, reinforcing the model's conclusion that positive behavioral intentions can lead to sustained technology adoption. Research by Vinnikova et al. [79] demonstrates that behavioral intention significantly mediates the relationship between perceived usefulness, perceived ease-of-use, and actual usage behavior of smartphone fitness applications, indicating that BIU strongly predicts technology usage. The study's findings suggest that enhancing behavioral intention can effectively increase app adoption, supporting the assertion of BIU's predictive strength.

Proposed model accounts for these dynamics through the PEU and PU constructs, highlighting that self-efficacy is essential for overcoming initial barriers to GenAI adoption. The proposed model accounts for the dynamics of Generative AI (GenAI) adoption through the constructs of perceived ease of use (PEU) and perceived usefulness (PU), highlighting the essential role of self-efficacy in overcoming initial barriers to adoption. Self-efficacy, defined as an individual's belief in their capability to perform a specific task [12], has been widely recognized as a critical determinant in technology acceptance [78].

Recent studies have reinforced this notion by demonstrating how self-efficacy enhances GenAI adoption. Kong et al. [80] found that self-efficacy significantly influences teachers' behavioral intentions toward using GenAI tools in education. Their study, based on an extended TAM framework, demonstrated that as users develop confidence in their ability to utilize AI tools, their perceptions of ease of use and usefulness increase, thereby facilitating smoother adoption. Similarly, Eldakar [81] integrated TAM with the UTAUT and Social Cognitive Theory (SCT) to explore how self-efficacy, ethical considerations, and academic integrity shape scholars' willingness to adopt GenAI. The findings indicate that higher self-efficacy not only fosters adoption but also alleviates concerns regarding ethical compliance and the credibility of AI-generated content.

In student populations, self-efficacy plays a similar role. Tantivejakul et al. [82] applied the Diffusion of Innovations (DOI) model alongside TAM to investigate students' perspectives on GenAI usage in academic writing. Their study revealed that students with higher self-efficacy were more likely to perceive GenAI as a beneficial tool for creative and technical writing. Similarly, Hsiao and Tang [83] identified personal innovativeness and self-efficacy as key factors influencing GenAI adoption in higher education, emphasizing the role of individual and technological determinants in shaping learning experiences. The insights from Al-Adwan et al. [73] regarding TAM adaptations for metaverse platforms suggest that as students' self-efficacy grows, their perceptions of ease and usefulness for complex technologies like GenAI improve, facilitating smoother adoption.

Moreover, faculty perspectives on GenAI adoption align with these findings. Shata and Hartley [84] examined the relationship between faculty self-efficacy and AI adoption, concluding that educators with higher self-efficacy were more likely to trust and integrate AI-powered tools into their teaching and research practices. Furthermore, Tan [85] explored students' long-term intentions to use GenAI through the lens of the Task-Technology Fit (TTF) model integrated with TAM. This study highlighted that self-efficacy, alongside the perceived fit between the task and the technology, significantly influenced continued AI adoption.

Taken together, these studies affirm that self-efficacy is a pivotal factor in the acceptance and sustained use of GenAI across educational and professional domains. Enhancing self-efficacy among students, educators, and professionals may serve as a strategic approach to fostering a more seamless integration of AI-driven technologies.

4. Conclusion and recommendations

The findings of this study support the proposed model, demonstrating the significant impact of self-efficacy on mathematics and science teachers' acceptance of Generative AI (GenAI) technology in academic settings. The positive correlations among the dimensions of academic self-efficacy—such as Academic Effort, Coping with Academic Problems, and Academic Planning—and the core constructs of technology acceptance (Perceived Ease of Use (PEU), Perceived Usefulness (PU), Attitude Toward Usage (ATU), and Behavioral Intention to Use (BIU)) validate the model's hypotheses and align with established theories in the literature on self-efficacy and technology acceptance. Self-efficacy was found to enhance pre-service teachers' perceptions of GenAI's ease of use and usefulness, which, in turn, fostered positive attitudes and stronger intentions to utilize the technology. The strong relationship between ATU and BIU further suggests that positive attitudes toward GenAI can effectively predict pre-service teachers' intentions and likelihood of adoption, indicating a robust framework for understanding the factors influencing GenAI acceptance.

To encourage the broader adoption of Generative AI (GenAI) in educational contexts, several strategies are recommended. First, institutions should enhance pre-service teachers' academic self-efficacy through targeted interventions, such as skills training, problem-solving workshops, and self-regulated learning activities. These interventions can increase their confidence in their academic abilities, thereby supporting more positive perceptions of GenAI tools. Second, integrating training programs that emphasize the practical benefits and ease of using GenAI may strengthen pre-service teachers' perceived usefulness and perceived ease of use, further fostering favorable attitudes toward adoption. Since the data also highlights the predictive role of behavioral intention, educational institutions and technology developers should consider creating supportive environments that sustain pre-service teachers' positive intentions, such as offering ongoing technical support and user-centered design in GenAI applications. Finally, as self-efficacy strongly influences attitudes and intentions, promoting a culture of technological confidence and capability-building among pre-service teachers will be essential for maximizing the effectiveness and adoption of GenAI tools in educational settings.

Future research on the relationship between self-efficacy and the acceptance of Generative AI (GenAI) in education should explore several avenues to enhance understanding and broaden applicability. Longitudinal studies could provide insights into

the stability of self-efficacy's influence on GenAI adoption over time. Comparative studies across different educational contexts (e.g., STEM versus humanities) may also reveal discipline-specific needs for fostering technology acceptance. Furthermore, examining the role of instructional support—such as peer networks or interactive tutorials—could identify resources that enhance the perceived ease of use and usefulness of GenAI. Social dynamics, including peer influence and social learning, should also be investigated to understand their moderating effects on self-efficacy and GenAI adoption, as supportive environments may facilitate technology uptake.

Future research should also focus on technology-specific self-efficacy—defined as the confidence in using Generative AI (GenAI) tools—since it may uniquely influence attitudes and behaviors toward GenAI. Experimentally evaluating interventions aimed at enhancing GenAI self-efficacy, such as structured training modules, could identify the most effective methods for increasing confidence and intentions to adopt these technologies. Additionally, understanding the barriers pre-service teachers face with low self-efficacy, such as technology-related anxiety or lack of motivation, could lead to more inclusive strategies for GenAI adoption. Furthermore, cross-cultural studies may reveal how various cultural contexts affect self-efficacy and acceptance of GenAI, while exploring psychological factors such as anxiety, motivation, and growth mindset could provide a comprehensive understanding of individual differences that impact technology acceptance. Collectively, these research avenues can inform targeted strategies to enhance self-efficacy, promote GenAI adoption, and support equitable technology integration in education.

References

[1] Radhwan, M. G., **Opportunities, Challenges, and Strategies for Integrating Generative Artificial Intelligence in Teaching and Learning in Higher Education**. In Prompt Engineering and Generative AI Applications for Teaching and Learning, edited by Areej ElSayary, 103-124, IGI Global, (2025).

[2] Wu, XY., & Chiu,T.K.F. Integrating learner characteristics and generative AI affordances to enhance self-regulated learning: a configurational analysis. **Journal of New Approaches Education Res.** 14, 10 (2025).

[3] Abdulayeva A, Zhanatbekova N, Andasbayev Y & Boribekova F.,Fostering AI literacy in pre-service physics teachers: inputs from training and co-variables. **Frontiers in Education**, 10, 1505420, (2025).

[4] Zhang, C., Schießl, J., Plößl, L. et al. Acceptance of artificial intelligence among pre-service teachers: a multigroup analysis. **International Journal of Educational Technology in Higher Education** 20, 49, (2023).

[5] L. Song, Improving pre-service teachers' self-efficacy on technology integration through service learning. **The Canadian Journal of Action Research,** 19, 1, 22-32, (2018).

[6] Lemon, N. & Garvis, S., Pre-service teacher self-efficacy in digital technology. **Teachers and Teaching**, 22, 3, 387–408, (2015).

[7] Zee, M. & Koomen, H. M., Teacher Self-Efficacy and Its Effects on Classroom Processes, Student Academic Adjustment, and Teacher Well-Being: A Synthesis of 40 Years of Research. **Review of Educational Research**, 86, 981-1015, (2016).

[8] Davis, F. D., Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. **MIS Quarterly**, 13, 3, 319–340, (1989).

[9] Venkatesh, V., & Davis, F. D., A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. **Management Science**, 46, 2, 186-204, (2000).

[10] Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D., User acceptance of information technology: Toward a unified view. **MIS Quarterly**, 27, 3, 425–478, (2003).

[11] Teo, T., Modeling the determinants of pre-service teachers' perceived usefulness of e-learning. **Campus-Wide Information Systems**, 28, 2, 124-140, (2011).

[12] Bandura, A., **Self-efficacy: The exercise of control**. W.H. Freeman, (1997).

[13] Schunk, D. H., & Pajares, F., **Self-Efficacy Theory**. In Handbook of motivation at school. Routledge. (2009)

[14] Tapan Broutın, M. S., Exploring Mathematics Teacher Candidates' Instrumentation Process of Generative Artificial Intelligence for Developing Lesson Plans. **Yükseköğretim Dergisi**, 14, 1, 165-176, (2024).

[15] Liu, M., Ren, Y., Nyagoga, L. M., Stonier, F., Wu, Z., & Yu, L., Future of education in the era of generative artificial intelligence: Consensus among Chinese scholars on applications of ChatGPT in schools. **Future in Educational Research,** 1, 1, 72-101, (2023).

[16] Tapalova, O., & Zhiyenbayeva, N., Artificial intelligence in education: AIEd for personalised learning pathways. **Electronic Journal of e-Learning,** 20, 5, 639-653, (2022).

[17] Lee,G., & Zhai, X., Using ChatGPT for science learning: A study on pre-service teachers' lesson planning. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, 17, 1683-1700, (2024).

[18] AbuSahyon, A. S. A. E., Alzyoud, A., Alshorman, O., & Al-Absi, B., AI-driven technology and chatbots as tools for enhancing English language learning in the context of second language acquisition: A review study. **International Journal**, 10, 1, 1209-1223, (2023).

[19] Kolluru, V., Mungara, S., & Chintakunta, A. N., Adaptive learning systems: Harnessing AI for customized educational experiences. **International Journal of Computational Science and Information Technology (IJCSITY)**, 6, 1, 2, (2018).

[20] Mishra, P., Koehler, M. J., & Henriksen, D., The Seven Trans-Disciplinary Habits of Mind: Extending the TPACK Framework Towards 21st Century Learning. **Educational Technology**, 51, 2, 22–28, (2011).

[21] Chen, X., Xie, H., Zou, D., & Hwang, G. J., Application and theory gaps during the rise of artificial intelligence in education. **Computers and Education: Artificial Intelligence**, 1, 100002, (2020).

[22] Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B., **Intelligence unleashed. An argument for AI in Education**. Pearson**,** (2016).

[23] Roschelle, J., Lester, J., & Fusco, J., **AI and the future of learning: Expert panel report**. Digital Promise, (2020).

[24] Andersen, C. L., & West, R. E., Improving mentoring in higher education in undergraduate education and exploring implications for online learning. **Revista de Educación a Distancia (RED)**, 20, 64, (2020).

[25] Tate, T., & Warschauer, M., Access, digital writing, and achievement: The data in two diverse school districts. **Journal of Writing Assessment**, 15, 1, 1-36, (2022).

[26] Bates, A.W., **Teaching in a Digital Age – Second Edition**. Tony Bates Associates Ltd., (2019).

[27] Pajares, F., Self-efficacy beliefs in academic settings. **Review of Educational Research**, 66, 4, 543-578, (1996).

[28] Schunk, D. H., & DiBenedetto, M. K., **Academic self-efficacy. In Handbook of positive psychology in schools**. Routledge, (2022).

[29] Zimmerman, B. J., Bandura, A., & Martinez-Pons, M., Self-motivation for academic attainment: The role of self-efficacy beliefs and personal goal setting. **American Educational Research Journal**, 29, 3, 663–676, (1992).

[30] Bingölbali, A. & Karakaya, Y. E., Investigation of academic self-efficacy according to perceptions of sports high school students. **Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi**, 31, 2, 607-613, (2021).

[31] Høigaard, R., Kovač, V. B., Øverby, N. C., & Haugen, T., Academic self-efficacy mediates the effects of school psychological climate on academic achievement. **School Psychology Quarterly**, 30, 1, 64, (2015).

[32] Ferla, J., Valcke, M., & Cai, Y., Academic self-efficacy and academic self-concept: Reconsidering structural relationships. **Learning and Individual Differences**, 19, 4, 499-505, (2009).

[33] Lent, R. W., Brown, S. D., & Gore Jr, P. A., Discriminant and predictive validity of academic self-concept, academic self-efficacy, and mathematics-specific self-efficacy. **Journal of Counselling Psychology**, 44, 3, 307. (1997)

[34] Yurt, E. The relationships among pre-service teachers' critical thinking disposition, self-efficacy, and creative thinking disposition in Turkey: a latent growth mediation model. **Curr Psychol** 44, 85–102 (2025).

[35] Burak, S., Self-efficacy of pre-school and primary school pre-service teachers in musical ability and music teaching. **International Journal of Music Education**, 37, 2, 257-271.(2019)

[36] Sultan, A. A., Henson, H., & Fadde, P. J., Pre-service elementary teachers' scientific literacy and self-efficacy in teaching science. **IAFOR Journal of Education**, 6, 1, (2018).

[37] Bleicher, R. E., Nurturing Confidence in Preservice Elementary Science Teachers. **Journal of Science Teacher Education**, 18, 6, 841-860, (2007).

[38] Velthuis, C., Fisser, P., & Pieters, J. M., Teacher training and pre-service primary teachers' self-efficacy for science teaching. **Journal of Science Teacher Education**, 25, 4, 445-464, (2014).

[39] Slater, E., & Main, S., A measure of classroom management: validation of a pre-service teacher self-efficacy scale. **Journal of Education for Teaching**, 46, 5, 616-630, (2020).

[40] Giles, R. M. & Kent, A. M., An investigation of pre-service teachers' self-efficacy for teaching with technology. **Asian Education Studies**, 1, 1, 32, (2016).

[41] Holden, H. K. & Rada, R., Understanding the influence of perceived usability and technology self-efficacy on teachers' technology acceptance. **Journal of Research on Technology in Education**, 43, 4, 343-367, (2011).

[42] Pendergast, D., Garvis, S., & Keogh, J., Pre-service student-teacher self-efficacy beliefs: an insight into the making of teachers. **Australian Journal of Teacher Education**, 36, 12, (2011)

[43] Caner, M. & Aydın, S., Self efficacy beliefs of pre-service teachers on technology integration. **Turkish Online Journal of Distance Education**, 79-94, (2021).

[44] Keser, H., Yılmaz, F. G. K., & Yılmaz, R., TPACK competencies and technology integration self-efficacy perceptions of pre-service teachers. **İlköğretim Online**, 14, 2, (2015).

[45] Karasar, N., **Bilimsel araştırma modelleri (25. Baskı)**. Nobel Yayıncılık, (2013).

[46] Liaw, S. S., & Huang, H. M., Perceived satisfaction, perceived usefulness and interactive learning environments as predictors to self-regulation in e-learning environments. **Computers & Education**, 60, 1, 14-24, (2013).

[47] Chemers, M. M., Hu, L., & Garcia, B. F., Academic self-efficacy and first-year college student performance and adjustment. **Journal of Educational Psychology**, 93, 1, 55-64, (2001).

[48] Hanham, J., Lee, C. B., & Teo, T., The influence of technology acceptance, academic self-efficacy, and gender on academic achievement through online tutoring. **Computers & Education**, 172, 104252, (2021).

[49] Zimmerman, B. J., & Schunk, D. H., **Self-regulated learning and academic achievement: Theoretical perspectives.** Routledge, (2011).

[50] Ajzen, I., The theory of planned behavior. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, 50, 2, 179-211, (1991).

[51] Venkatesh, V., & Bala, H., Technology acceptance model 3 and a research agenda on interventions. **Decision Sciences**, 39, 2, 273–315, (2008).

[52] Park, S. Y., Nam, M. W., & Cha, S. B., University students' behavioral intention to use mobile learning: Evaluating the technology acceptance model. **British Journal of Educational Technology**, 43, 4, 592–605, (2012).

[53] Kandemir, M., An explanatory model of academic procrastination behaviour. Doctoral dissertation, Gazi University, (2010).

[54] Venkatesh, V., & Davis, F. D., A model of the antecedents of perceived ease of use: Development and test. **Decision Sciences**, 27, 3, 451-481, (1996).

[55] Schumacher, R. E., & Lomax, R. G., **A beginner's guide to structural equation modeling (3rd ed.)**, Routledge Pub., (2010).

[56] Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J.-Y., & Podsakoff, N. P., Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. **Journal of Applied Psychology**, 88, 5, 879-903, (2003).

[57] Ullman, J. B., & Bentler, P. M., **Structural equation modeling. Handbook of Psychology, Second Edition.** Eds I. Weiner, J.A. Schinka and W.F. Velicer, John Wiley & Sons, Inc., (2012).

[58] Field, A., **Discovering statistics using IBM SPSS statistics**, Sage, (2024).

[59] Kock, F., Berbekova, A., & Assaf, A. G., Understanding and managing the threat of common method bias: Detection, prevention and control. **Tourism Management**, 86, 104330, (2021).

[60] Byrne, B. M., **Structural equation modeling with Mplus: Basic concepts, applications, and programming,** Routledge, (2013).

[61] Von Eye, A., & Bogat, G. A., Testing the assumption of multivariate normality. **Psychology Science**, 46, 243-258, (2004).

[62] Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., & Ullman, J. B., **Using multivariate statistics,** Pearson, (2013).

[63] Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C., **Multivariate data analysis (4th ed.): With readings**. Prentice-Hall, Inc., (1995).

[64] George, D., & Mallery, P., **IBM SPSS Statistics 25 Step by Step**. Routhledge, (2019).

[65] Taber, K. S., The use of cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. **Research in Science Education**, 48, 6, 1273–1296, (2018).

[66] Bagozzi, R. P., & Phillips, L. W., Representing and testing organizational theories: A holistic construal. **Administrative Science Quarterly**,27, 3 459-489, (1982).

[67] Hu, L., & Bentler, P. M., Fit indices in covariance structure modeling: Sensitivity to under parameterized model misspecification. **Psychological Methods**, 3(4), 424–453, (1998).

[68] Bandura, A., & Zimmerman, B. J., **Self-regulation of academic studying: The role of self-efficacy and self-regulatory skill.** In D. H. Schunk & B. J. Zimmerman (Eds.), Self-regulation of learning and performance: Issues and educational applications (pp. 1–19). Lawrence Erlbaum Associates, (1994).

[69] Pan, X., Technology acceptance, technological self-efficacy, and attitude toward technology-based self-directed learning: learning motivation as a mediator. **Frontiers in Psychology**, 11, 1-11, (2020).

[70] Yulian, R., Yuniarti, Y., & Lee, N. A. A., Technology acceptance of augmented reality to attitude and self-efficacy in learning English. **Journal of English Language Teaching Innovations and Materials (Jeltim)**, 4, 2, 127, (2022).

[71] Budu, K. W. A., Mu, Y., & Mireku, K. K., Investigating the effect of behavioral intention on e-learning systems usage: empirical study on tertiary education institutions in Ghana. **Mediterranean Journal of Social Sciences**, 9, 3, 201-216, (2018).

[72] Al Kurdi, B., Alshurideh, M., & Salloum, S. A., Investigating a theoretical framework for e-learning technology acceptance. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, 10, 6, 6484-6496, (2020).

[73] Al-Adwan, A. S., Li, N., Al-Adwan, A., Abbasi, G. A., Albelbisi, N. A., & Habibi, A., Extending the technology acceptance model (TAM) to Predict University Students' intentions to use metaverse-based learning platforms. **Education and Information Technologies**, 28, 11, 15381-15413, (2023).

[74] Latip, M. S. A., Tamrin, M., Noh, I., Rahim, F. A., Nur, S., & Latip, N. A., Factors affecting e-learning acceptance among students: The moderating effect of self-efficacy. **International Journal of Information and Education Technology**, 12, 2, 116-122, (2022).

[75] Fishbein, M., & Ajzen, I., **Belief, attitude, intention, and behavior: An introduction to theory and research.** Addison-Wesley, (1975).

[76] Yanto, D. T. P., Ganefri, Hastuti, Candra, O., Kabatiah, M., Andrian, … & Zaswita, H., The affecting factors of students' attitudes toward the use of a virtual laboratory: a study in industrial electrical engineering. **International Journal of Online and Biomedical Engineering (IJOE)**, 19,13, 4-16, (2023).

[77] Jang, J., Ko, Y., Shin, W. S., & Han, I., Augmented reality and virtual reality for learning: an examination using an extended technology acceptance model. **IEEE Access**, 9, 6798-6809, (2021).

[78] Venkatesh, V., Determinants of perceived ease of use: Integrating control, intrinsic motivation, and emotion into the technology acceptance model. **Information Systems Research**, 11, 4, 342-365, (2000).

[79] Vinnikova, A., Lu, L., Wei, J., Fang, G., & Yan, J., The use of smartphone fitness applications: the role of self-efficacy and self-regulation. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17, 20, 7639, (2020).

[80] Kong, S. C., Yang, Y., & Hou, C., Examining teachers' behavioural intention of using generative artificial intelligence tools for teaching and learning based on the extended technology acceptance model. **Computers and Education: Artificial Intelligence,** 7, 100328, (2024).

[81] Eldakar, M. A., Shehata, A. M., & Ammar, A. S., What motivates academics in Egypt toward generative AI tools? An integrated model of TAM, SCT, UTAUT2,

perceived ethics, and academic integrity. **Information Development**, 02666669251314859, (2025).

[82] Tantivejakul, N., Chantharasombat, J., & Kongpolphrom, W., Voices of the future: exploring students' views on the use of GenAI in academic and professional pr writing. **LEARN Journal: Language Education and Acquisition Research Network**, 17, 2, 511-537, (2024).

[83] Hsiao, C. H., & Tang, K. Y., Beyond acceptance: an empirical investigation of technological, ethical, social, and individual determinants of GenAI-supported learning in higher education. **Education and Information Technologies**, 1-26, (2024).

[84] Shata, A., & Hartley, K., Artificial intelligence and communication technologies in academia: faculty perceptions and the adoption of generative AI. **International Journal of Educational Technology in Higher Education**, 22, 1, 14, (2025).

[85] Tan, P., Factors Affecting Students' Continuance Usage Intention of Generative Artificial Intelligence (GenAI) in Higher Education, Doctoral dissertation, Tunku Abdul Rahman University of Management and Technology, (2024).

[86] Collie, R. J., Martin, A. J., & Gasevic, D., Teachers' generative AI self-efficacy, valuing, and integration at work: Examining job resources and demands. **Computers and Education: Artificial Intelligence**, 7, 100333, (2024).

Compliance with Ethical Standards

Disclosure of potential conflicts of interest

No conflict of interest.

Funding

None

CRediT author statement

The article was collaboratively written by two authors, with each contributing equally to its content.

Research involving Human Participants and/or Animals

The study involves human participants. Ethics committee permission was obtained from Balıkesir University Social Sciences and Humanities Scientific Research and Publication Ethics Committee (03.04.2024 - 2024/03).

ANNEX -1

Descriptive Statistics, Internal Consistency, Convergent Validity and Reliability of Items.

Constructs	Item	Factor Loadings	Mean	Sd	Cronbach's α	CR	AVE
Cope with Academic Problems (ASE1)	ASE6	.65	3.78	0.777	.859	.92	.51
	ASE7	.65	3.24	0.965			
	ASE8	.68	3.58	0.947			
	ASE9	.69	3.48	0.981			
	ASE10	.66	3.23	1.042			
	ASE14	.73	3.76	0.856			
	ASE15	.76	3.57	0.854			
	ASE16	.65	3.5	0.886			
	ASE17	.81	3.65	0.764			
	ASE18	.83	3.84	0.75			
	ASE19	.70	3.6	0.826			
Academic Effort (ASE2)	ASE1	.71	3.98	.725	.729	.81	.52
	ASE3	.69	3.95	.665			
	ASE4	.75	3.85	.809			
	ASE5	.73	3.41	.999			
Academic Planning (ASE3)	ASE2	.66	3.67	.840	.713	.76	.52
	ASE11	.71	3.28	1.088			
	ASE13	.79	3.70	.791			
Perceived usefulness (PU)	PU1	.86	4.05	0.735	.889	.92	.75
	PU2	.86	4.04	0.75			
	PU3	.90	4.02	0.736			
	PU4	.86	4.06	0.689			
Perceived ease of use (PEU)	PEU1	.82	3.56	0.889	.886	.90	.64
	PEU2	.87	3.89	0.751			
	PEU3	.66	3.39	0.944			
	PEU4	.83	3.42	0.92			
	PEU5	.82	3.54	0.875			
Attitudes towards usage (ATU)	ATU1	.58	3.27	1.006	.705	.76	.53
	ATU2	.72	3.5	0.9			
	ATU3	.86	3.75	0.894			
Behavioral intention to use (BIU)	BIU1	.90	3.9	0.783	.892	.93	.83
	BIU2	.91	4.01	0.745			
	BIU3	.93	4.01	0.773			

DOI:10.25092/baunfbed. 1634587 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 705-718, (2025)*

Afyon Zonu Kuzeybatısındaki (Tava Dağı/Çavdarhisar/Kütahya) metamorfik kayaçların kinematik özellikleri

Ali Kamil YÜKSEL[1,*], Meral YILMAZ[2]

[1]Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çağış Kampüsü Balıkesir
[2]Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çağış Kampüsü Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 25.02.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 22.05.2025

Öz

İnceleme alanı, Türkiye'nin tektonik bölgelerinden biri olan Afyon Zonu içerisinde yer almaktadır. En altta, Triyas'dan daha eski ve farklı kökende çakıllar içeren Orta-Üst Triyas yaşlı meta-kırıntılılardan oluşan İkibaşlı Formasyonu yer almaktadır. İkibaşlı Formasyonu üste doğru uyumlu bir şekilde Jura yaşlı karbonatlı kayalardan oluşan Çiçeklikaya Formasyonu'na geçiş yapar. Her iki formasyon, Eosen döneminde bir nap (Muratdağı Melanjı) bindirmesine maruz kalmış ve sonuçta İkibaşlı Formasyonu'na ait kırıntılılar artan basınç ve sıcaklık koşullarında metamorfizma geçirmiştir. Afyon zonu kuzeyinde yer alan Tavşanlı zonunda ise daha fazla derinliklerde dolayısı ile daha fazla basınç/sıcaklık koşullarında mavi şist metamorfizması gerçekleşmiştir. Nap yerleşimi/bindirmesi esnasında metamorfizmaya uğrayan kayalarda farklı basınç ve sıcaklık koşullarında sünümlü bir şekilde ikincil yapılar gelişebilmektedir. Bu yapıların başlıcaları kıvrımlar, foliasyon düzlemleri, lineasyonlar, makaslama bandı klivajları, sigmoidal makro ve mikro çakıl ve porfiroklastlardır. Bu çalışmada, İkibaşlı Formasyonu içerisinde gelişen ikincil yapıların mostra ve mikro ölçekte tespiti/ölçümü ile nap hareketinin yönü ve zamanlaması ortaya konulmaya çalışılmıştır. Tüm veriler ışığında bu nap hareketinin Eosen döneminde Kuzeydoğu'ya doğru olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Afyon zonu, makaslama zonu, kinematik belirteçler, nap yerleşimi.*

[*]Ali Kamil YÜKSEL, akyuksel@balikesir.edu.tr, http://orcid.org/0000-0003-3793-6294
Meral YILMAZ, my.meralyilmaz1984@gmail.com, http://orcid.org/0009-0000-7288-726X

Kinematic properties of metamorphic rocks in the northwest of the Afyon Zone (Tava Mountain/Çavdarhisar/Kütahya)

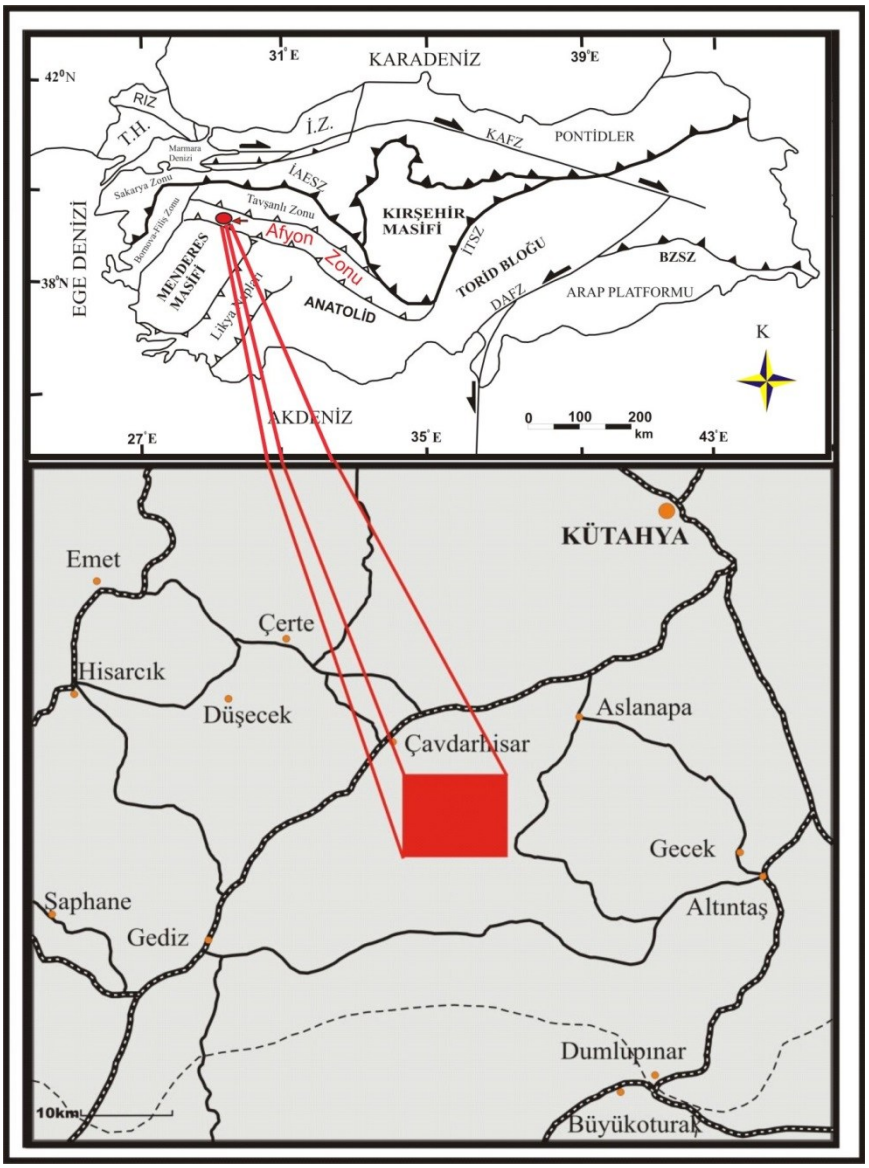
Abstract

The investigated area is located within the Afyon Zone, one of the tectonic units of Turkey. İkibaşlı Formation, consisting of Middle-Upper Triassic metaclastics containing gravels of different origins and older than the Triassic, forms the lowest section of the investigated area stratigraphicaly. İkibaşlı Formation passes upwards conformably to the Çiçeklikaya Formation, which consists of Jurassic carbonate rocks. Both formations were subjected to a nappe (Muratdağı Melange) emplacement during the Eocene period, and as a result, the clastics of the İkibaşlı Formation underwent metamorphism with increasing pressure and temperature conditions. In the Tavşanlı zone, located to the north of the Afyon zone, blueschist metamorphism occurred at greater depths and therefore under higher pressure/temperature conditions. In rocks that have undergone metamorphism during the nappe emplacement/thrust, ductile secondary structures can develop under different pressure and temperature conditions. Mainly secondary structures are folds, foliation planes, lineations, shear band cleavages, sigmoidal macro and micro gravels and porphyroclasts. In this study, the direction and timing of the nappe emplacement were tried to be revealed by the definition/measurement of secondary structures developed in the İkibaşlı Formation on mesoscopic and micro scale. And in the light of all the data, it was determined that this nappe movement was towards to the northeast during the Eocene period.

Keywords: *Afyon zone, shear zone, kinematic indicators, nap emplacement.*

1. Giriş

Bu çalışmada, Tava dağı (Çavdarhisar/Kütahya) civarındaki metamorfik kayaçlar incelenmiştir. Yaklaşık 300 km^2'lik bir alanı içeren inceleme alanı, 1/25.000 ölçekli Kütahya J23c1, J23c4, J23d2 ve J23d3 paftaları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1). İnceleme alanının Kuzeydoğusunda yüzlekler veren Tetis okyanusunun taban kalıntısı olan Muratdağı Melanjı'na ait ofiyolitik ve karmaşık kütlelerin inceleme alanına tektonik yerleşmesi/bindirmesi sonucu, bölgede, daha öncesinde yer alan kayalar (İkibaşlı Formasyonu) üzerindeki kalıcı izlerinin tespiti ve kinematik analizi çalışmanın asıl konusunu oluşturmaktadır.



Şekil 1. İnceleme alanının yeri ve Türkiye'nin tektonik birliklerindeki konumu [1] (KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, İAESZ: İzmir-Ankara-Erzincan Sütur Zonu, RIZ: Rodop-Istranca Zonu, TH: Trakya Havzası, İZ: İstanbul Zonu, İTSZ: İç Torid Sütur Zonu, BZSZ: Bitlis-Zagros Sütur Zonu).

Birçok kıtasal mozaik parçaları kapsayan Türkiye, Güneyde Gondwana ile kuzeyde Lavrasya arasında tektonik bakımdan oldukça aktif olan Alp–Himalaya orojenik dağ kuşağında yer almaktadır. En geç Kretase–Erken Senozoyik'te tüketilmiş olan Tetis Okyanusu'na ait kalıntılar içeren İzmir–Ankara sütur zonu kuzeydeki Lavrasya'yı güneydeki Gondwana'dan ayırmaktadır [2]. Bu kapanma ile ilişkili olarak Anatolid-Torid kara parçasının kuzey böümü Alpin orojenezinden etkilenmiş, metamorfik fasiyeslerine ve metamorfizmanın gerçekleştiği zamana göre bölgelere ayrılmış ve adlandırılmıştır. İnceleme alanının da içinde yer aldığı Türkiye'nin Batısı, farklı özellikteki tektonik kuşaklardan oluşmaktadır. Batı Anadolu'nun Kuzey'inden Güney'ine bu bölgeler sırası ile; Sakarya Zonu-Pontidler, İzmir-Ankara-Erzincan okyanusuna ait sütur zonu (Neotetis kuzey kolu), Bornova Flişi, Tavşanlı ve Afyon Zonları, Menderes Masifi ile Likya Napları'dır. Kinematik çalışmaların yapıldığı bu

çalışma (Çavdarhisar GD'su/Kütahya) ise Türkiye tektonik kuşaklarından olan Afyon Zonu'nda yer almaktadır (Şekil 1).

Batı-Orta Anadaolu'da çok geniş bir alanda birbirleri ile tektonik dokanak halinde olan Tavşanlı ve Afyon Zonu, Alpin orojenezi esnasında dalma-batma sonucu yüksek basınç-düşük sıcaklık (YB/DS) koşullarında metamorfizma geçirmiş bölgelere iyi birer örnektir. Anatolidlerin başlıca tektonik birliklerinden ve Kütahya–Bolkardağ Kuşağı'nın [3,4] bir parçası olarak da yorumlanan Afyon Zonu, Prekambriyen temel ve onu üzerleyen Paleozoyik-Mesozoyik bir örtüden oluşmaktadır [5,6]. Afyon Zonu'nda yapılan önceki çalışmalarda, bu kayaçların yeşilşist fasiyesinde metamorfizma geçirdiği, kuzeyinde tektonik bir dokanak boyunca bulunan Tavşanlı Zonu'na ait kayaçlarda ise mavişist metamorfizmasının egemen olduğu belirtilmektedir [5,7]. Ancak, Candan vd. (2005), Afyon Zonu'nun temel ve örtü serilerinde tespit ettikleri glokofan ve Fe-Mg-karfolit minerallerine dayanarak Afyon Zonu'ndaki yeşilşist fasiyesinin aksine bölgede Alpin mavişist fasiyesi metamorfizmasının etkin olduğuna değinmişlerdir [6]. Aynı yazarlar, tespit etikleri bu mineral parajenezine göre mavişist metamorfizmasındaki basıncın minimum 6-9 kbar, sıcaklığın 350^0C ve gömülme derinliğinin ise 30km oluğunu belirtmişlerdir. Tavşanlı Zonu'ndaki metamorfizmaya ait basıncın 24kbar, sıcaklığın da 440^0 C olması ise Tavşanlı Zonu'nun, Afyon Zonu'na kıyasla 60km'den daha fazla derinliğe gömülmüş olduğunu göstermektedir [7]. Bu iki bölgenin YB/DS metamorfizma yaşları ise Tavşanlı Zonunda Ar-Ar ve Rb-Sr yaş tayinine göre 80 my [8], Afyon Zonu'nda ise Afyon bölgesindeki Geç Maastrihtiyen yaşlı mermerleri uyumsuz olarak örten Paleosen-Erken Eosen yaşlı metamorfizma geçirmemiş birimlere göre göreceli olarak Paleosen'dir [9].

Kaya vd. (1995), inceleme alanının da bulunduğu Afyon Zonu kayaçlarını, kuzeyde Tavşanlı Zonu'nun mavişistleri ile güneyde Menderes Masifi kayaları arasında kalan Anki-metamorfik kırıntılılar olarak belirtmiş ve bu sleytimsi kaya grubunu Alt Sleyt, Üst Sleyt ve Kireçtaşı Birimi olarak bölümlemiştir [10]. Bu çalışmadaki stratigrafik olarak temeli oluşturan İkibaşlı Formasyonunun eşleniği olan Alt Sleyt biriminin üst seviyelerinde fosiller ile Erken Ladiniyen yaşı elde etmiş ve metakırıntılıların dereceli ve uyumlu olarak Jura yaşlı Kireçtaşı Birimine geçtiğini tespit etmiştir.

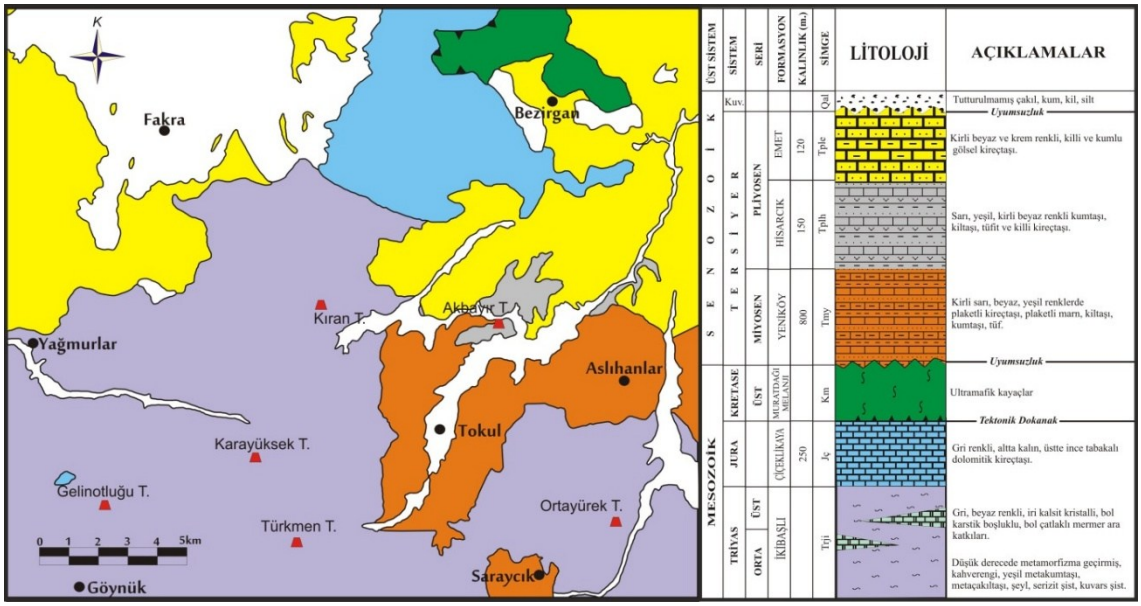
İzmir-Ankara Sütur Zonu'nun yani Neotetis okyanusunun kuzey kolunun Üst Kretase-Eosen zaman aralığında kapanması, Lavrasya ile Gondwana kıtalarının bir araya gelmesini sağlamış, yitim, ekaylanmalar ve çarpışmalar gibi süreçler meydana gelmiştir. Kretase döneminde meydana gelen Neotetis okyanusunun tüketilmesi ile okyanusal kabuğa ait dilimler, sedimanter ve volkanitler ile karışarak (Muratdağı Melanjı) Eosen'e dek bölgedeki otoktonlar üzerine tektonik olarak yerleşmişlerdir.

Afyon Zonu kayaçlarına ait literatürde yeterli tektonik çalışma bulunmamasına karşın güneyinde yer alan Menderes Masifinde pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara göre Menderes Masifinde, Alpin öncesi, sırası ve sonrasında dört deformasyon fazı ve bunlarla ilişkili çok sayıda metamorfizma süreçlerinin gerçekleştiği belirtilmiştir [11]. Afyon Zonu içerisinde yer alan inceleme sahamızdaki kinematik çalışmalar ise Alpin dönemi sünümlü bir deformasyon (D_1) ve mavişist fasiyesine erişen bir metamorfizma ile Neotektonik dönem gevrek deformasyon (D_2) fazlarını işaret etmektedir. Napların tektonik yerleşimi/bindirmesi esnasında gelişen deformasyon fazı (D_1) ile metamorfizmaya uğrayan İkibaşlı Formasyonu'na ait kırıntılılarda farklı basınç ve sıcaklık koşullarında sünümlü bir şekilde ikincil yapılar gelişmiştir. Bu yapılardan

bazıları lineasyonlar, makaslama bandı klivajları, sigmoidal makro ve mikro çakıl ve porfiroklastlardır. Neotektonik dönemde gelişen gevrek D_2 deformasyon fazı ise D_1'e ait yapıları yüksek açılı faylar ile kestiği arazi çalışmalarında görülmüştür. Bu çalışmada, İkibaşlı Formasyonu içerisinde gelişen ikincil yapıların mostra ve mikro ölçekte tespiti/ölçümü ile nap hareketinin yönü ve zamanlaması ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. Stratigrafi

Çalışma alanının temelini, Kaya (1972)'nın tanımladığı Alt Sleyt biriminin eşleniği olan serizit, kuvars, klorit ve kloritoyid şistlerden oluşan İkibaşlı Formasyonu oluşturmaktadır (Şekil 2) [12]. Formasyon, uyumlu olarak Jura yaşlı Çiçeklikaya formasyonuna geçiş yapmaktadır. Üst Kretase yaşlı Muratdağı Melanjı ise bu metakırıntılılar ve karbonatlı kayalar üzerinde tektonik olarak bulunmaktadır. Volkano-sedimanter tabakalı serilerden meydana gelen Yeniköy Formasyonu (Miyosen), Mesozoyik yaşlı kaya birimlerini açısal uyumsuz olarak örtmüş, üzerine ise Pliyosen yaşlı kırıntılılardan oluşan Hisarcık ve Emet Formasyonları çökelmiştir. Bu çalışmada, Neojen kaya birimlerinin yanı sıra çalışmanın asıl konusunu oluşturan Mesozoyik kaya birimleri üzerinde durulacaktır.



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası [13].

Bölgenin temelini oluşturan İkibaşlı Formasyonu, arazi çalışmalarında gözlenebilen en alt kesiminde (Saraycık KD'su) Paleozoyik yaşlı olması muhtemel elipsoidal mermer, kuvarsit ve şist çakıllarından oluşan bir konglomera ile başlar (Şekil 3). Metakonglomeratik seviye haricinde ise birim, kahverengimsi, grimsi ve yer yer yeşilimsi mostra renkleri sunan serizit–kuvars şist, klorit–serizit şist ve kloritoyit şist türü kayalardan oluşmaktadır (Şekil 3). İnce kesitlerde gözlenen iğnemsi kloritoyitlerin aksine karfolit, granat ve biyotitin olmaması, Güngör (2013)'ün çalışmasında belirttiği gibi bölgedeki metamorfizma koşullarının 3 kilobarı geçmeyen bir basınca ve 350^0C'den daha düşük bir sıcaklığa sahip olduğunu göstermektedir [14]. Şistlerin içerisinde mercekler şeklinde bol çatlaklı, karstik erime boşlukları barındıran, mavimsi-grimsi renkler sunan karbonatlı seviyeler de gözlenmiştir. Kaya vd. (1995), formasyonun eş değeri olan Alt Sleyt biriminin üst seviyelerinde Erken Ladiniyen yaşı veren

foraminiferler tespit etmiştir [10]. Akay vd. (2011), şistler içerisindeki karbonatlı seviyeler haricinde metariyolitik sokulumlar da tespit etmiş, Akal (2008) ise bu metariyolitik sokulumlardaki zirkonlardan 240,8 ± 3,7 My (Anisiyen) yaşını bulmuştur [15,16]. Gerek bu veriler gerekse Jura yaşlı karbonatlı kayalara uyumlu geçişinden dolayı İkibaşlı Formasyonunun yaşı Orta-Üst Triyas olarak bu çalışmada kabul edilmiştir.

Şekil 3. a) Elipsoidal mermer, kuvarsit ve şist çakıllarından oluşan konglomera (Saraycık KD'su) (Koordinatlar: 39.04676/29.85935); İkibaşlı Formasyonundan kloritoyit şiste ait b) (II. Nikol, 10x) c) (I. Nikol, 10x) ince kesit görüntüleri (Görüntü Boyutu: 2mm).

Budağan Dağı civarında (Emet/Kütahya KD'su), dolomitik bileşimde olan Çiçeklikaya Formasyonu ile İkibaşlı Formasyonu arasındaki uyumlu geçiş Akay vd. (2011) tarafından gözlenmiş ve elde edilen paleontolojik bulgular ile yaşı Jura olarak tespit edilmiştir [15].

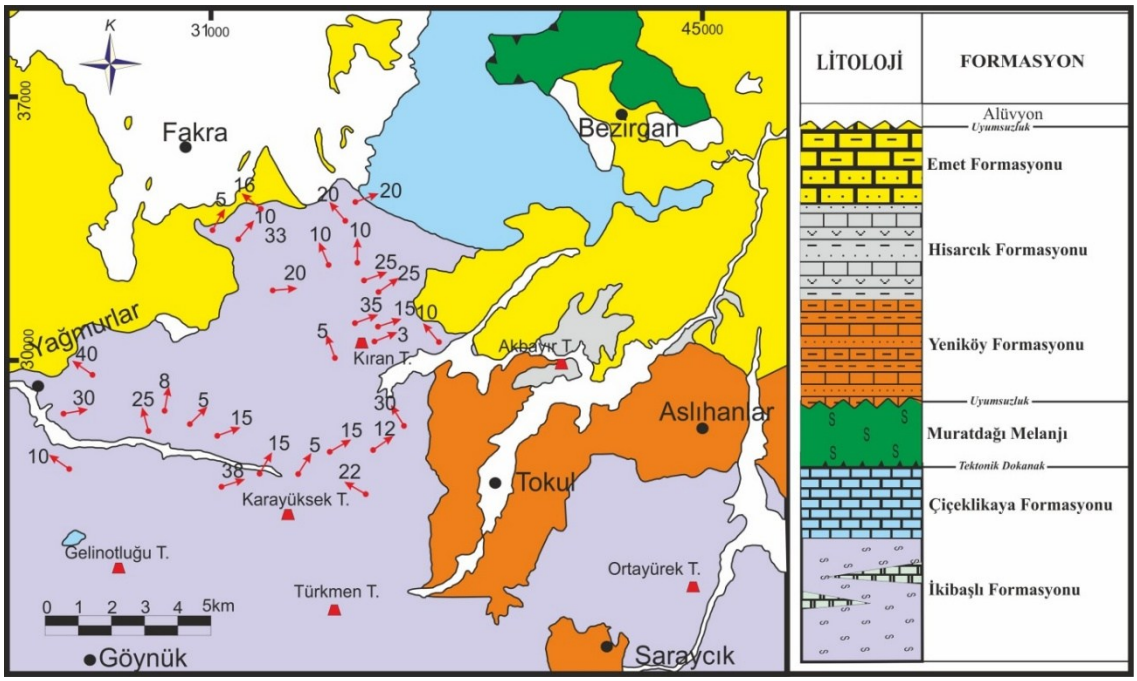
İkibaşlı ve Çiçeklikaya Formasyonları üzerinde ise tektonik olarak bölgeye yerleşmiş Neotetis okyanus tabanına ait ultramafikler ve ofiyolitik karmaşıktan meydana gelen Muratdağı Melanjı bulunmaktadır. Çoğunlukla serpantinize peridotitlerden oluşan Muratdağı Melanjı farklı bölgelerde metamorfik dilimler de barındırmaktadır [17,18]. Murat Dağı'nda (Gediz/Kütahya), Yüksel vd., (2014) tespit ettikleri peridotitler ile melanj arasında kalan metamorfik dilime ait hornblendlerde $^{40}Ar/^{39}Ar$ yaş analizi ile 100.7 my yaşını elde etmişlerdir [18]. Allokton Muratdağı Melanjının yerleşiminden sonra, bölgedeki Mesozoyik yaşlı kayaçlar üzerinde uyumsuz fakat kendi içlerinde uyumlu olarak Neojen yaşlı Yeniköy Formasyonu, Hisarcık ve Emet Formasyonları çökelim yapmıştır.

3. Kinematik çalışmalar

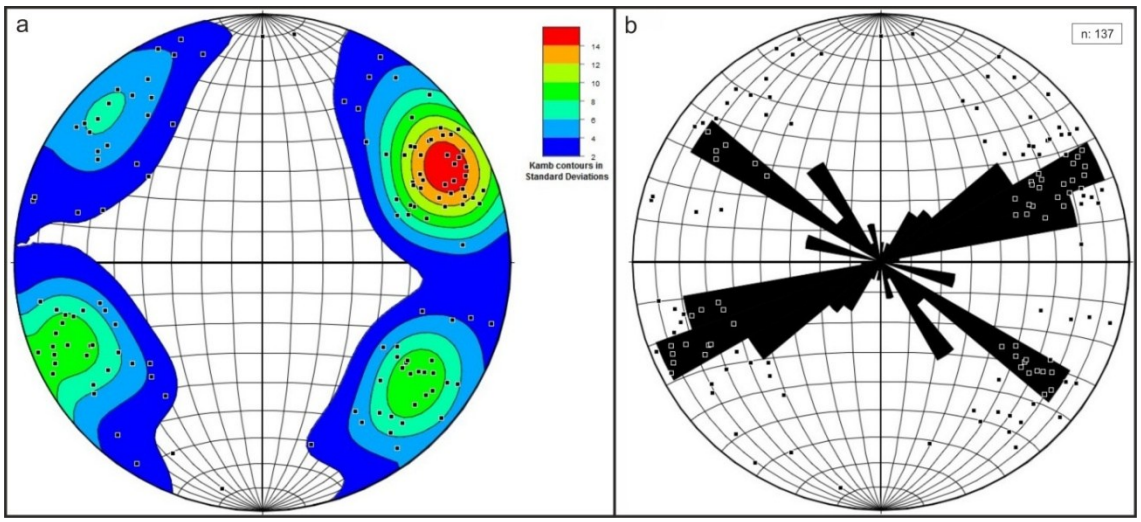
Muratdağı Melanjına ait napların tektonik yerleşimi esnasında gelişen deformasyon fazı (D_1) ile deforme olan İkibaşlı Formasyonu'na ait kırıntılılarda sünümlü bir şekilde ikincil lineasyonlar, foliasyoniçi kıvrımlar, makaslama bandı klivajları (S/C tip), sigmoidal makro ve mikro çakıl ve porfiroklastlar (σ–tip) gelişmiştir. Bu bölümde, gelişen ikincil yapıların mostra ve mikro ölçekte tespiti/ölçümü ile nap hareketinin yönü ve zamanlaması ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Deformasyona maruz kalmış kayaçlarda ikincil olarak gelişen lineasyonlar, nap hareketi sonucu gelişen makaslama deformasyonunun etkin olduğu bölgelerde, makaslama ile yer değiştiren blokların hareket yönü doğrultusuna paralel bir şekilde gelişmektedir. Bu linear yapılar ise uzama, mineral ve arakesit lineasyonlarıdır. D_1 fazı ile gelişen ve arazi çalışmaları ile ölçümü yapılan lineasyonlar (L_1), bölgedeki nap hareketinin doğrultusunu Kuzeydoğu–Güneybatı olarak göstermektedir. Ölçümü gerçekleştirilen lineasyonların bir kısmının harita üzerindeki dağılımları Şekil 4'te, Schmidt ağı alt yarım küresi üzerindeki ve gül diyagramındaki dağılımları ise Şekil 5'te gösterilmiştir. Stereografik plot ve gül diyagramında iki ana doğrultu (64/21 ve 130/22) yönü ortaya çıkmış ancak baskın olan yönün KD-GB olduğu gözükmektedir.

Arazi çalışmaları esnasında, KB-GD yönünde gelişmiş olan linear yapılar ile baskın yönde gelişmiş KD-GB linear yapılar arasında kesme-kesilme ilişkisi asla saptanamamıştır. Ayrıca baskın yön haricinde gelişen bu KB-GD yapıların genellikle yersel devrik kıvrımların kanatlarındaki ve kıvrımlanma (D_1) ile rotasyona uğramış lineasyonlar olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile bu iki farklı yöndeki yapıların bölgede etkin olmuş tek bir sünümlü deformasyona (D_1) ait ürünler olduğu kesinleşmiştir.

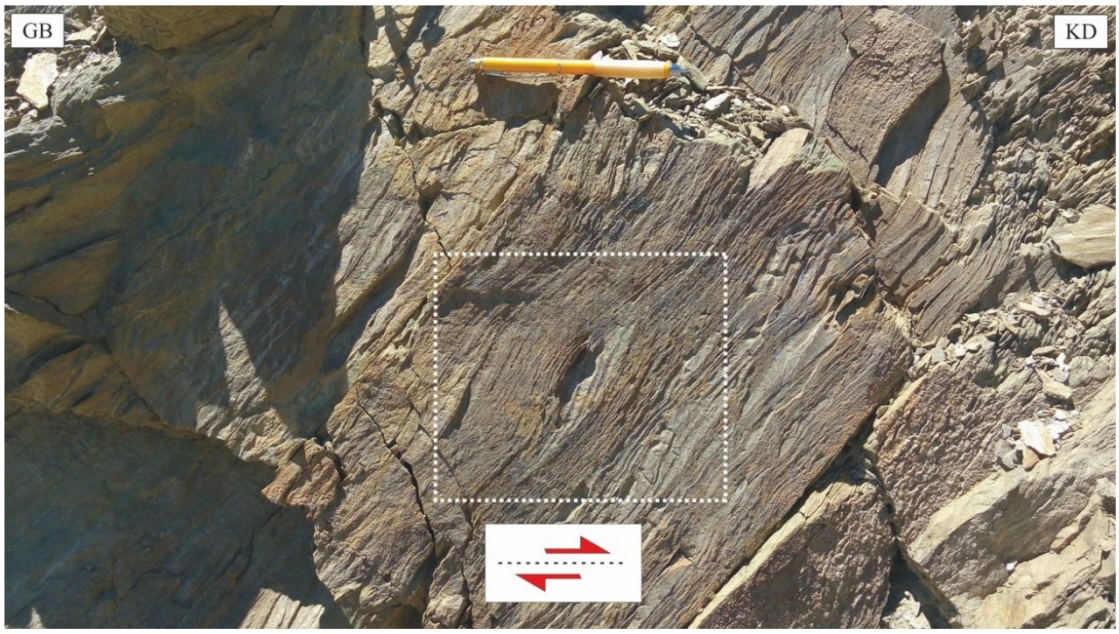


Şekil 4: İkibaşlı Formasyonunda ölçülen linear yapılardan bazılarının arazideki dağılımları.

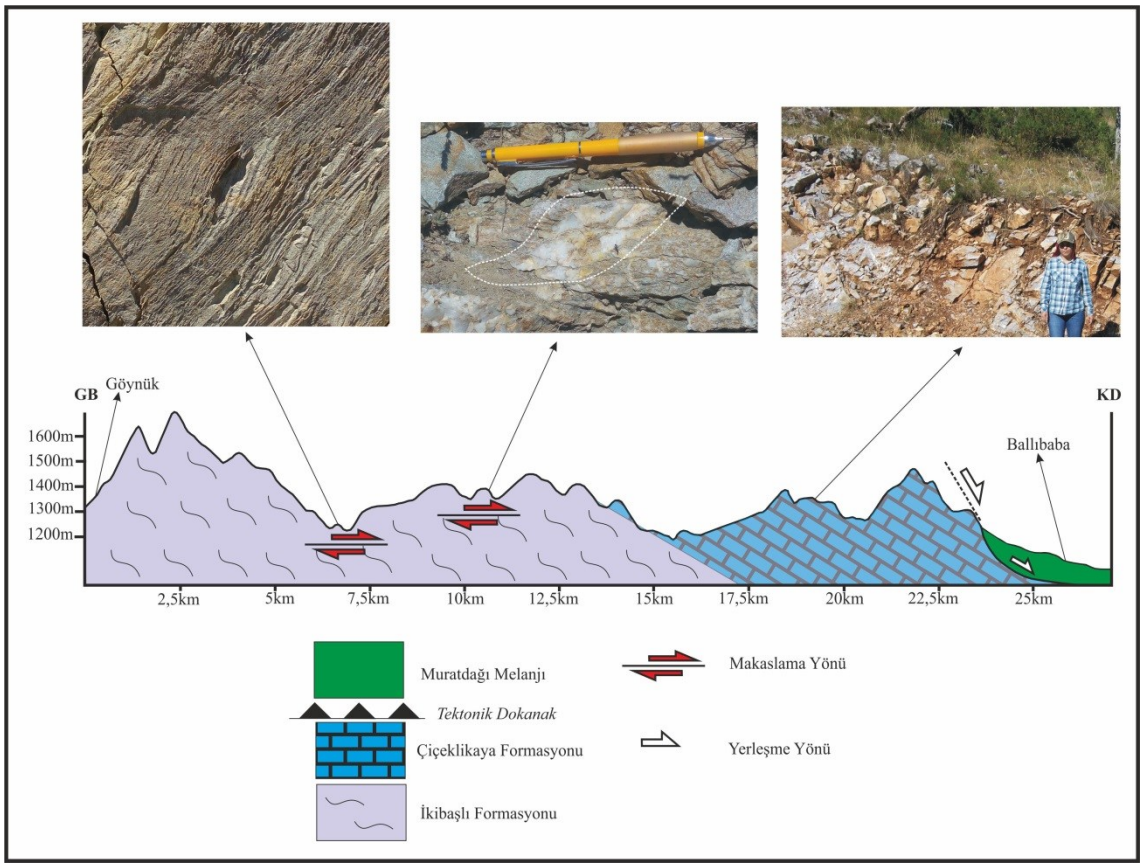


Şekil 5: a) Ölçümü gerçekleştirilen linear yapılara ait stereografik plot; b) Linear yapılara ait gül diyagramı.

Jeolojide en çok çalışılan konulardan biri de kıvrımlardır. Makaslama bölgeleriyle ilişkili kıvrımlar genel olarak iki türdür: (i) düşük iç-kanat açılarına ve aşırı bükülmüş eksen çizgilerine sahip kın/kılıf kıvrımları ile (ii) makaslama ile eş zamanlı gelişen foliasyoniçi (intrafolial fold) kıvrımlardır [19]. Arazi çalışmalarında metakırıntılılar içerisinde kın/kılıf kıvrımları gözlenememiş sadece foliasyoniçi kıvrım gözlenebilmiştir. Makaslama deformasyonu ile eş yaşlı gelişen bu foliasyoniçi kıvrım, makaslama yönü için üst bloğun sağa yani Kuzeydoğuya doğru olduğunu göstermektedir (Şekil 6,7).

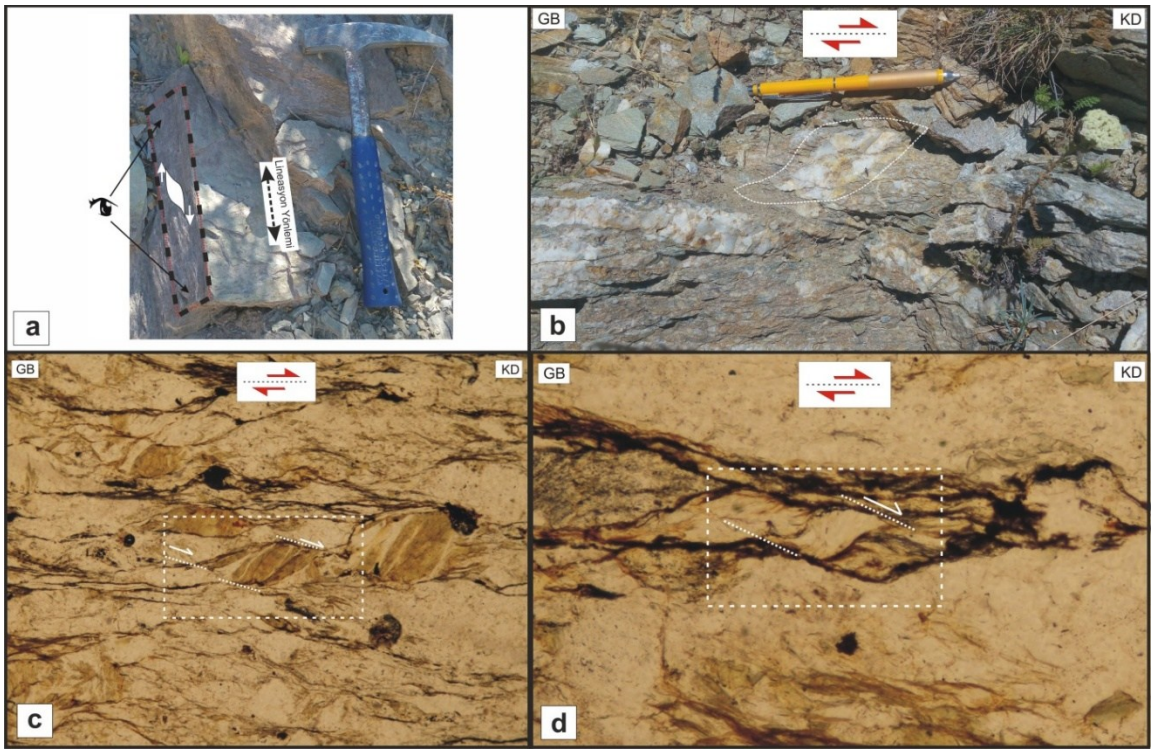


Şekil 6. İkibaşlı formasyonu içerisinde gelişmiş foliasyoniçi kıvrım, nap yerleşiminde üst bloğun KD'ya doğru hareket ettiğine işaret etmektedir (Koordinatlar: 39.06725/29.67125).



Şekil 7: Göynük-Ballıbaba arasının enine kesiti ve KD nap yerleşimine ait kinematik göstergeler.

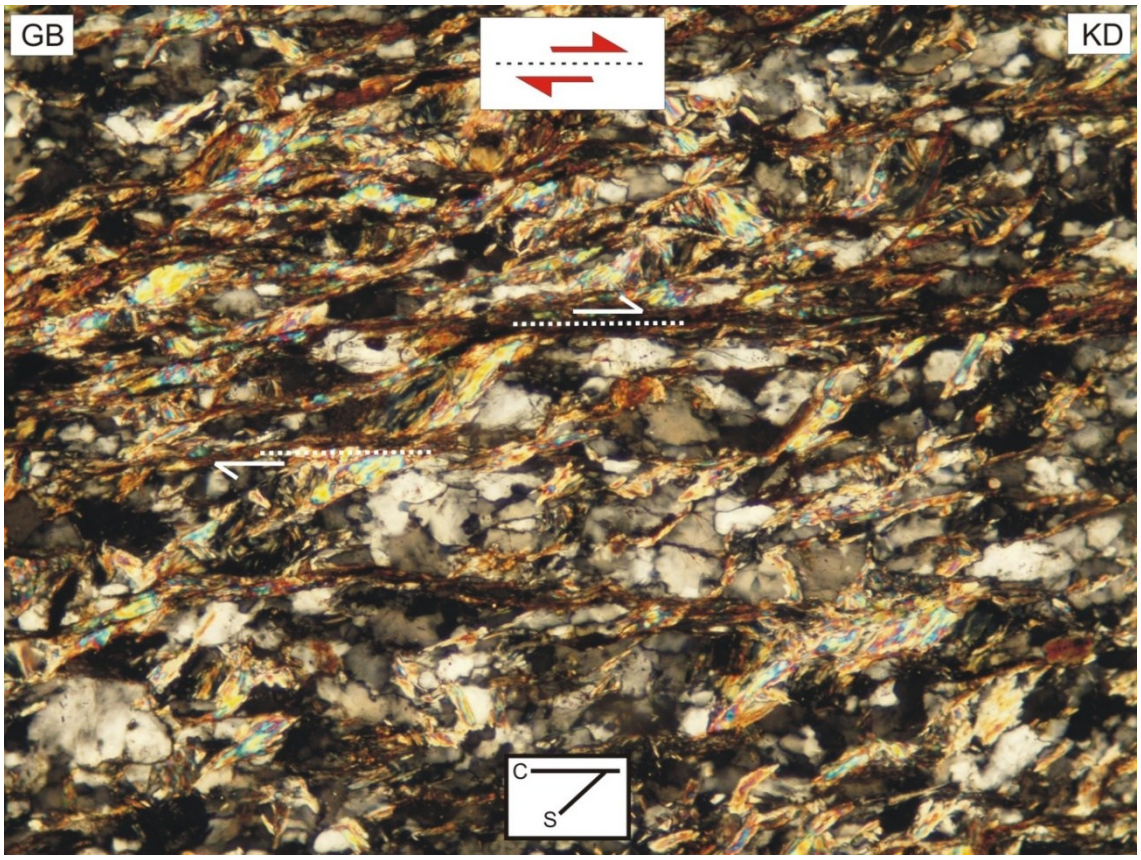
Makaslama deformasyonuna neden olan nap yerleşiminin hareket yönünün belirlenmesinde σ- ve δ-tip asimetrik porfiroklastlardan da yararlanılmaktadır. Porfiroklastlar, makaslamaya maruz kalmış bölgelerdeki kayaçlarda gelişen boyutsal anlamda matrikse göre iri olan minerallerdir. Matriks ile porfiroklast aynı mineral bileşiminde ise (i) manto; farklı bileşimde ise (ii) basınç gölgesi olarak adlandırılmaktadır [20]. Manto ve porfiroklastlar, sünümlü bir şekilde gelişen deformasyon sonucunda, makaslama yönüne paralel kuyruklar şeklinde deforme olmaktadır. Farklı seviyelerde birbirine paralel gelişen bu kuyruklar makaslama yönü belirteci olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yapıların, makaslama yönünü doğru bir şekilde işaret etmesi için lineasyona paralel, foliasyona dik bir şekilde mostra vermiş yüzeylerde gözlenmesi ve ölçülmesi gerekmektedir (Şekil 8). Arazi çalışmalarında, mostra ölçeğinde ve uygun yüzeylerde nadir olarak tespit edilen farklı seviyelerde kuyruklara sahip kuvars, makaslama hareketi için üst bloğun KD'ya doğru hareket ettiğini göstermektedir. Araziden alınan yönlü örneklere ait ince kesitlerde ise tanımlanan porfiroklastlar çoğunlukla muskovit türü olup, etrafı basınç gölgesiyle çevrili ve yine üst bloğa ait hareketin KD'ya doğru olduğunu göstermektedir (Şekil 8).



Şekil 8. a) Lineasyon ve foliasyon düzleminin tanımlanmasından sonra incelenen foliasyona dik yüzey. b) Uygun yüzeyde gözlenen sigmoidal kuvars çakılı üst bloğun KD'ya doğru hareketini göstermektedir (Koordinatlar: 39.00434/29.81902); c, d) İkibaşlı Formasyonundan alınan yönlü ince kesitlerdeki muskovitlerin kuyrukları, nap yerleşimi ile ilişkili üst bloğun sağ yönlü (KD'ya) hareketini göstermektedir (Görüntü boyu: 2mm).

Passchier ve Trouw (2005), orta dereceli makaslama zonlarında ve makaslama yönünden farklı doğrultuda mikro ve mostra ölçeğinde gelişebilen, S/C ve S/C' tip olarak adlandırılan Makaslama Bandı Klivajlarını (Shear Band Cleavage) tanımlamıştır [20]. Birbiriyle kesişen makaslama bandları (C) ile foliasyon düzlemlerinin (S) durumu makaslama yönünün belirlenmesinde kullanılmaktadır. Arazi çalışmalarında, mostra ölçeğinde makaslama bandı klivajları gözlenememiş ancak yönlü ince kesitlerde

tanımlanmıştır. Yönlü ince kesitte tanımlanan tipik S/C yapısı, nap yerleşiminde üst bloğa ait hareketin yine KD'ya doğru olduğunu göstermektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Yönlü ince kesitte tanımlanan tipik S/C tipi makaslama bandı klivajı, makaslama yönü için üst sağı yani KD'yu göstermektedir (Görüntü boyu: 2mm).

4. Sonuçlar

Afyon Zonu'nda yer alan metakırıntılılarda hem mostra hem de mikroskop ölçeğinde kinematik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Arazide gerçekleştirilen ölçümler foliasyona dik ve lineasyona paralel yüzeylerde uygulanmıştır. İkibaşlı Formasyonunda tanımlanan linear yapılar çoğunlukla KD-GB yönlemine sahiptir. KB-GD yönelimli çizgiselliklerin ise yersel devrik kıvrımlanmalar ile ilişkili olduğu tespit edilmiş, ilksel yönelimlerinin yine KD-GB olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile çalışma alanında, sünümlü olarak tek bir deformasyon fazının (D_1) etkin olduğu görülmüştür. D_1 deformasyonu ile ikincil olarak gelişen mostra ölçeğindeki foliasyoniçi kıvrım ve sigmoidal kuvars çakılı, mikroskop ölçeğinde ise muskovit porfiroklastları ile S/C tip makaslama bandı klivajı, lineasyon yönlemine paralel olarak nap yerleşiminde üst bloğun KD'ya hareket ettiğini göstermektedir. Miyosen öncesi, kuzey yönlü nap hareketlerine dair veriler Menderes Masifine ait alt masiflerinde yapılan çalışmalarda da yer almaktadır [21-28].

Mostra ve mikroskop ölçeğinde belirlenen KD yönlü nap hareketinin zamanlaması için yerel olarak bakıldığında, hem Orta-Üst Triyas yaşlı metakırıntılılar hem de Muratdağı Melanjına ait malzemeler uyumsuz olarak Orta-Üst Miyosen yaşlı Yeniköy Formasyonu ile örtülmektedir. Bu da nap hareketi için göreceli ve yerel olarak en geç Orta Miyosen'i

göstermektedir. Ancak bölgesel korelasyonda ise Eosen yaşlı Başlamış Formasyonu'nun (Başlamış Köyü/Akhisar) Muratdağı Melanjı ile eş yaşlı ofiyolitik seri üzerine açısal diskordans ile çökelmesi, nap hareketinin zamanlamasını daha da geriye çekerek Eosen'e indirmiştir [29]. Tüm veriler ışığında çalışma alanındaki nap yerleşimine ait hareketin zamanı için Eosen dönemi daha uygun görülmüştür.

Neotektonik dönemde ise bölgede, sünümlü D_1 deformasyon fazından sonra kırıklar/faylar ile temsil olunan gevrek bir şekilde etkin olmuş D_2 deformasyon fazı, D_1 fazına ait yapıları kestiği görülmüştür.

5. Teşekkür

Bu çalışma, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 2017/039 no'lu "Tava Dağı'nın (Kütahya) Metamorfik Kayaçlarının Yapısal Özellikleri" başlıklı proje ile desteklenmiştir. Projeden çıkan bulgular, 5-9 Eylül 2018'de "International Conference on Science and Technology" (Prizren/Kosova) adlı konferansta sunulmuştur.

Kaynaklar

[1] Okay, A.I. and Tüysüz, O., Tethyan sutures of northern Turkey. Durant, B., Jolivet, F., Horvath, F., Seranne, M. (ed.). The Mediterranean basin: Tertiary extension within the Alpine orogen. **Geological Society Special Publication,** 156, 475- 515, (1999).

[2] Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y., Tethyan evolution of Turkey: A Plate tectonic approach. **Tectonophysics**, 75, 181-241, (1981).

[3] Göncüoğlu, M. C., Kütahya - Bolkardağ Kuşağının Jeolojisi. **Bulletin of the Mineral Research and Exploration**, 142, 227-282, (2011).

[4] Özcan, A., Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., Uysal, Ş. ve Şentürk, K., Late Palaezoic evolution of the Kütahya-Bolkardağı Belt. **Middle East Technical University Journal of Pure and Applied Sciences**, 21/1-3, 211-220, (1990).

[5] Okay, A.I., Distribution and characteristics of the northwest Turkish blueschists. In: The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean (ed. J.E. Dixon & A.H.F. Robertson), **Geological Society Special Publication**, 17, 455-466, (1984).

[6] Candan, O., Çetinkaplan, M., Oberhansli, R., Rimmele, G. and Akal, C., Alpine high-P/low-T metamorphism of the Afyon Zone and implications for the metamorphic evolution of Western Anatolia, Turkey. **Lithos**, 84, 102-124, (2005).

[7] Okay, A.I., Satır, M., Maluski, H., Sıyako, M., Monie, P., Metzger, R., Akyüz, S., Paleo- and Neo-Tethyan events in northwestern Turkey: geologic and geochronologic constraints. In: The Tectonic Evolution of Asia (eds Yin, A. & Harrison, T.M.), **University Press, Cambridge**, 420–441, (1996).

[8] Okay, A.I., Tavşanlı Zonu: Anatolid-Torid Bloku'nun dalma-batmaya uğramış kuzey ucu. **Maden Tetkik ve Arama Dergisi**, 142, 195-226, (2011).

[9] Pourteau, A., Sudo, M., Candan, O., Lanari, P., Vidal, O., Oberhänsli, R., Neotethys closure history of Anatolia: insights from ^{40}Ar– ^{39}Ar geochronology and P–T estimation in high-pressure metasedimentary rocks. **Journal of Metamorphic Geology**, 31, 585–606, (2013).

[10] Kaya, O., Sadeddin, W., Altıner, D., Meriç, E., Tansel, İ. ve Vural, A., Tavşanlı (Kütahya) güneyindeki ankımetamorfik kayaların stratigrafisi ve yapısal konumu:

İzmir-Ankara zonu ile bağlantısı. **Maden Tetkik ve Arama Dergisi**, 117, 5-16, (1995).

[11] Bozkurt, E., Oberhänsli, R., Menderes Massif (Western Turkey): structural, metamorphic and magmatic evolution – a synthesis. **International Journal of Earth Sciences**, **89**, 679–708 (2001).

[12] Kaya, O., Tavşanlı yöresi ofiyolit sorununun ana çizgileri. **Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni**, XV, 1, 26-108, (1972).

[13] Günay, E., Akdeniz, N., Şaroğlu, F. ve Çağlayan, A., Murat Dağı-Gediz dolaylarının jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Raporu, Ankara, (1986).

[14] Güngör, T., Kinematics of the Central Taurides during Neotethys closure and collision, the napped in the Sultan Mountains, Turkey. **International Journal of Earth Sciences** (Geol Rundsch) 102, 1381-1402, (2013).

[15] Akay, E., Işıntek, İ., Erdoğan, B. and Hasözbek, A., Stratigraphy of the Afyon Zone around Emet (Kütahya, NW Anatolia) and geochemical characteristics of the Triassic volcanism along the northern Menderes Massif. **Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen Band**, 188 Heft 3, p. 297-316, (2011).

[16] Akal, C., Candan, O., Koralay, O.E., Okay, A., Oberhansli, R. and Chen, F., Afyon Zonundaki Erken Devoniyen asidik magmatizmaya ait jeolojik, jeokimyasal ve jeokronolojik ön bulgular. **61. Türkiye Jeoloji Kurultayı**, Ankara, (2008).

[17] Önen, A.P. and Hall, R., Sub-ophiolite metamorphic rocks from NW Anatolia, Turkey. **Journal of Metamorphic Geology**, 18, 483–495, (2000).

[18] Yüksel, A.K., Güngör, T. ve Kılıç, A.M., Kuzeybatı Anadolu'daki ofiyolit tabanı metamorfik kayaçlarından yeni bulgular (Gediz-Kütahya). **Türkiye Jeoloji Bülteni**, 57, 2, 19-34, (2014).

[19] Alsop GI, Holdsworth RE., Shear zone folds: records of flow perturbation or structural inheritance? In Flow Processes in Faults and Shear Zones, edited by G.I. Alsop, R.E. Holdsworth, K.J.W. McCaffey, and M. Hand, **Geological Society of London**, Special Publication, vol. 224, pp. 177–799, (2004).

[20] Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J., **Microtectonics (2nd Edition)**. Springer Berlin Heidelberg New York, 366 pp, (2005).

[21] Arslan, A., Güngör, T., Erdoğan, B. and Passchier, C. W., Tectonic transport directions of the Lycian nappes in Southwest Turkey constrained by kinematic indicators. **Journal of Asian Earth Sciences**, 64, 198-209, (2013).

[22] Güngör, E. and Erdoğan, B., Emplacement age and direction of the Lycian Nappesin the Söke-Selçuk region, western Turkey. **International Journal of Earth Sciences**, 89, 874-882, (2001).

[23] Bozkurt, E. and Park, R.G., The structure of the Palaeozoic schists in the southern Menderes Massif, western Turkey, a new approach to the origin of the main Menderes metamorphism and its relation the Lycian Nappes, **Geodinamica Acta**, 12, 25-42, (1999).

[24] Bozkurt, E., Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, western Anatolia, Turkey. **International Journal of Earth Sciences**, 89, 728-744, (2001).

[25] Buğdaycıoğlu, Ç., Tectono-metamorphic evolution of the northern Menderes Massif: evidence from the horst between Gördes and Demirci Basins (West Anatolia, Turkey). Ph.D. Thesis. The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Ankara, (2004).

[26] Rimmelé, G., Jolivet, L., Oberhänsli, R. and Goffé, B., Deformation history of the high-pressure Lycian Nappes and implications for tectonic evolution of SW Turkey. **Tectonics**, 22, 1007-1029, (2003).

[27] Rimmelé, G., Oberhänsli, R., Goffé, B., Jolivet, L., Candan, O. and Çetinkaplan, M., First evidence of high-pressure metamorphism in the 'Cover Series' of the southern Menderes Massif, Tectonic and metamorphic implications for the evolution of the SW Turkey. **Lithos**, 71, 19-46, (2003).

[28] Akdeniz, N., Başlamış Formasyonu. **Jeoloji Mühendisliği Dergisi**, 4 (1), 39-48, (1980).

DOI:10.25092/baunfbed. 1694675 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 719-735, (2025)*

Seyhan Havzası'nda düşük akımların analizi

Selman BAYSAL[1,*], S. Utku YILMAZ[2], F. Sencer KAÇAR[3], Bihrat ÖNÖZ[4]

[1]*Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl., Terzioğlu Yerleşkesi, Çanakkale.*
[2]*İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl., Maslak Kampüsü, İstanbul.*
[3]*Türk-Alman Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl., Beykoz, İstanbul.*
[4]*Işık Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak. İnşaat Müh. Böl., Şile Kampüsü, İstanbul.*

Geliş Tarihi (Received Date): 07.05.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.05.2025

Öz

Bu çalışmada Seyhan Havzası'nda yer alan istasyonlarda düşük akım analizi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda kısa, orta ve uzun vadeli kuraklık tespiti için d = 1, 7, 10 ve 15 günlük yıllık ortalama minimum debi değerleri kullanılarak düşük akım frekans analizi yapılmıştır. İki parametreli Log-Normal (LN2), Gamma (G2), Weibull (W2), Üstel (E2), Gumbel (GEV-I), Lojistik (L2) dağılımları ile üç parametreli GEV (GEV-III), Log-Normal (LN3), Pearson Tip III (P3), Log-Pearson Tip III (LP3) ve Genel Lojistik (GL3) dağılımları kullanılarak farklı dönüş aralıklarına sahip düşük akım tahminleri gerçekleştirilmiştir. Kolmogorov-Smirnov (K-S) uygunluk testi ile farklı istatistiksel dağılımların mevcut zaman serilerine uygunluğu tespit edilmiştir. Elde edilen düşük akımlardaki eğimin (trend) belirlenmesi için Mann-Kendall (MK), Trend-Free Pre-Whitening (TFPW) ve yenilikçi trend analizi (ITA) testleri uygulanmıştır. Çalışmada altı farklı istasyon ölçümleri kullanılarak elde edilen bulgular, Seyhan Havzası'nda en iyi tahminlerin LN2, P3, GEV-III ve LN3 dağılımları ile elde edildiğini göstermiştir. Seçilen anlamlılık düzeyinde üç istasyonda azalan trend bulunmuş olup, anlamlı bir trend tespit edilemeyen diğer istasyonlarda ITA testleri ile azalan bir eğilim belirlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, bu istasyonlarda özellikle son 10-15 yıllık süreçte ölçülen debilerin önemli miktarda azaldığı ve dolayısıyla küresel iklim değişikliği de göz önüne alındığında kuraklık riskinin olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: *Seyhan Havzası, düşük akım analizi, kuraklık riski.*

[*]Selman BAYSAL, selmanbaysal@comu.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-5917-3542
S. Utku YILMAZ, yilmazselaha@itu.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-4789-6663
F. Sencer KAÇAR, furkan.kacar@tau.edu.tr, https://orcid.org/0009-0000-1764-8207
Bihrat ÖNÖZ, bihrat.onoz@isikun.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-4531-2476

Low flow analysis in the Seyhan Basin

Abstract

In this study low-flow analysis was conducted at various measurement stations within the Seyhan Basin. Low-flow frequency analysis was performed to estimate the drought risks in the short, medium, and long term using annually-averaged minimum discharge values corresponding to durations of d = 1, 7, 10, and 15 days. Low-flow estimates for different return periods were obtained using both two-parameter distributions, namely Log-Normal (LN2), Gamma (G2), Weibull (W2), Exponential (E2), Gumbel (GEV-I), and Logistic (L2), and three-parameter distributions, namely Generalized Extreme Value (GEV-III), Log-Normal (LN3),Pearson Type III (P3), Log-Pearson Type III (LP3), and Generalized Logistic (GL3). The goodness-of-fit between the various probability distributions and observed time series was investigated using the Kolmogorov-Smirnov (K–S) test. To observe trends in the low flows estimated by these distributions, various statistical tests were applied, including the Mann-Kendall (MK), Trend-Free Pre-Whitening (TFPW), and innovative trend analysis (ITA). The results obtained using measurements from six different stations indicate that the most accurate estimations for the Seyhan Basin were obtained using the P3, GEV-III, and LN3 distributions. At the designated significance level, a decreasing trend was observed at three stations. For the remaining stations where no statistically significant trend was identified, ITA tests revealed a negative trend. Based on these findings, it can be concluded that the flow rates measured at these stations have substantially decreased, suggesting a potential drought risk in the region.

Keywords: *Seyhan Basin, low-flow analysis, drought risk.*

1. Giriş

Belirli bir bölgede, su miktarında normal düzeye göre uzun bir süre boyunca görülen eksiklik olarak tanımlanan kuraklık, ekstrem durumları ifade etmektedir [1]. Düşük akımlar ise, kuraklık çalışmalarında kullanılan ve her akım yılında görülebilen normalden düşük değerlere sahip akımlar olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, akarsu havzalarında düşük akımların hidrolojik ve istatistiksel anlamda incelenmesi ve bu akımların olasılık dağılımlarının belirlenmesi, mevcut su kaynaklarının verimli kullanımı, kuraklık riskinin belirlenmesi ve ekosistemlerin korunması açısından büyük önem arz etmektedir [2].

Hidrolojide düşük akımların incelenmesinde kullanılan yöntemler, genellikle düşük debilerin frekans, süre ve şiddet yönünden analiz edilmesini ve gelecekteki düşük akım risklerinin belirlenmesini hedefler. Özellikle iklim değişikliği etkilerinin giderek önem kazandığı günümüzde, düşük akımların istatistiksel ve zamana bağlı değişim analizi yöntemleri kritik bilgiler sağlamaktadır. Düşük akımların incelenmesinde istatistiksel dağılımlara bağlı debi tahminleri, trend analizi, gidişler (runs) analizi ve kuraklık indeksleri gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan düşük akım frekans analizi, belirli sürelerdeki düşük akımların istatistiksel özelliklerinin belirlenmesini, böylece düşük akımların ve kurak dönemlerin olasılık temelli öngörülebilmesini mümkün kılması

nedeniyle [3, 4] özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde hem ekosistem sürdürülebilirliği hem de tarımsal ve kentsel su temini açısından oldukça önemli bir analizdir [5, 6].

Düşük akım analizlerinde farklı coğrafi ve iklimsel koşullara sahip bölgelerde Log-Normal, Weibull, Pearson Tip III ve Genel Ekstrem Değer (GEV) gibi çeşitli istatistiksel dağılımlar kullanılmaktadır [7]. Türkiye'de gerçekleştirilen birçok çalışma düşük akımların genellikle iki ve üç parametreli olasılık dağılımlarına uyduğunu ortaya koymaktadır. Önöz ve Bayazıt [8] 16 farklı nehirde düşük akımları incelemiş ve Weibull dağılımının log-normal dağılıma göre verileri daha iyi temsil ettiğini ortaya koymuşlardır. Eriş vd. [9] çalışmasında farklı bölgelerdeki akış zaman serilerini farklı olasılık dağılımları için incelemiş ve verilerin çoğunlukla 3 parametreli Log-Normal (LN3) ve Weibull dağılımlarına uyduğunu göstermişlerdir. Yılmaz vd. [10], Seyhan Havzası'nda farklı istasyonlarda gerçekleştirdikleri düşük akım ve kuraklık analizleri sonucunda 2 parametreli Log-Normal (LN2) ve Weibull dağılımlarının düşük akımları en iyi temsil ettiğini göstermişlerdir. Öte yandan, Türkiye'de son yıllarda yapılan çalışmalarda, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde düşük akımların ciddi oranda azalan bir trende sahip olduğu tespit edilmiştir [18-20].

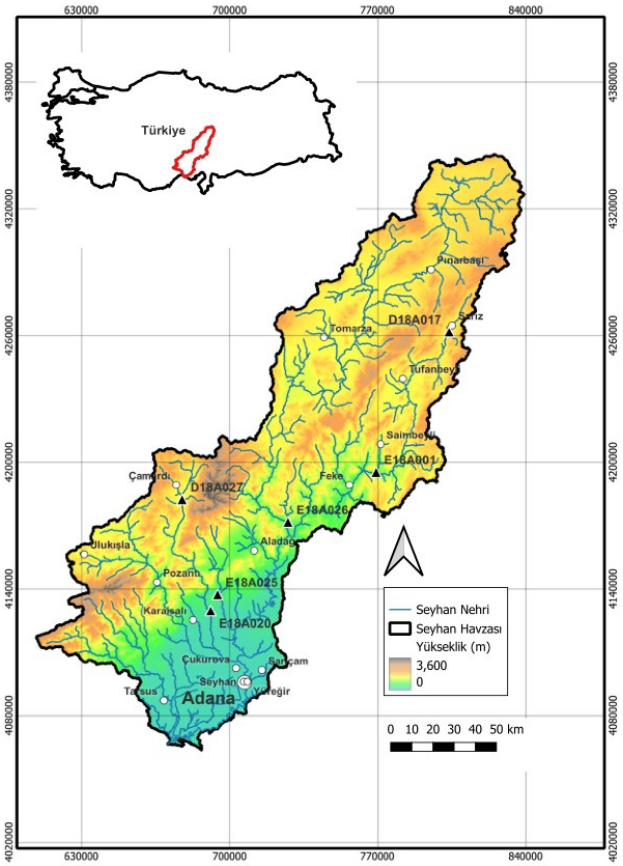
Uygun dağılım fonksiyonunun seçiminde performans ölçütlerinin doğru belirlenmesi kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda, dağılım fonksiyonlarının ölçülen düşük akım verilerine uygunluğunu değerlendirmek amacıyla Kolmogorov-Smirnov (K-S) ve Anderson-Darling (A-D) gibi testlerin kullanılması önerilmektedir [9, 11-13].

Hidrolojik verilerdeki zamansal eğilimlerin (trendlerin) belirlenmesi, düşük akım karakteristiklerinin uzun vadeli değişimini değerlendirmek açısından önemlidir. Parametrik olmayan Mann-Kendall trend testi ve Yue ve Wang [14] tarafından seri korelasyonunun varlığında kullanılması önerilen Trend-Free Pre-Whitening (TFPW) yaklaşımları sıkça kullanılan trend analizi yöntemleridir. Ayrıca Şen [15] tarafından geliştirilen ve parametrik olmayan yenilikçi trend analizi (Innovative Trend Analysis, ITA), görsel bir trend analizi olup verilerin dağılımından ve otokorelasyonundan etkilenmemesi sebebiyle oldukça tercih edilmektedir. Mann-Kendall testi, parametrik olmayan doğası nedeniyle birçok çalışmada kullanılırken, TFPW yöntemi seri korelasyonunun etkisini ortadan kaldırarak daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır [16, 17].

Bu çalışmada amaç, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) ve mülga Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) günlük ortalama akım gözlem verilerinden yararlanılarak Türkiye'nin önemli su kaynaklarından biri olan Seyhan Havzası'nda yer alan E18A001, D18A017, E18A020, E18A025, E18A026 ve E18A027 numaralı ölçüm istasyonlarında (Şekil 1 ve Tablo 1) bir düşük akım analizi gerçekleştirmektir. Bu akım gözlem istasyonları için d = 1, 7, 10 ve 15 günlük minimum yıllık ortalama debiler kullanılarak hem iki hem de üç parametreli dağılımlar ile düşük akım tahminleri yapılmıştır. Elde edilen tahmin dağılımlarının gözlenen düşük akım verilerine uygunluğunu değerlendirmek amacıyla Kolmogorov-Smirnov (K-S) uygunluk testleri yapılmıştır. Son olarak, Mann-Kendall, TFPW ve ITA trend testleri ile verilerin trend analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm çalışma boyunca açık kaynak kodlu R® ve MATLAB® yazılımlarından yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçların, bölgesel su yönetimi stratejilerine ve çevresel sürdürülebilirlik politikalarına bilimsel zemin sağlaması beklenmektedir.

Tablo 1. Bu çalışmada incelenen gözlem istasyonlarına ait bilgiler (Bu veriler, DSİ resmî internet sayfasında yer alan *Akım Gözlem Yılıkları'n*dan alınmıştır).

İstasyon numarası ve adı	Yağış alanı (km^2)	Yaklaşık Yükselti (m)	Gözlem süresi	Ortalama debi (m^3/s)	En düşük debi (m^3/s)
E18A001 Göksu - Himmetli	2596.8	665	1988 – 2011	26.53	8.63
D18A017 Sarız Suyu - Darıdere	202.7	1548	1997 – 2011	1.52	0.07
E18A020 Körkün Suyu – Hacılı Köp.	1440.8	167	1988 – 2015	10.94	0.59
E18A025 Eğlence Deresi - Eğribük	544,5	222	1988 – 2015	8.19	0.95
E18A026 Zamanti Nehri - Ergenuşağı	8698.1	360	1988 – 2015	59.36	10.10
E18A027 – Zamanti Nehri - Değirmenocağı	7718.0	740	1988 – 2015	22.69	0.88



Şekil 1. Seyhan Havzası'nın coğrafi konumu ve çalışmada incelenen gözlem istasyonları (istasyon numaralarındırmasında DSİ güncel *Akım Gözlem Yıllıkları* notasyonu kullanılmış olup, "D" DSİ ölçümlerini, "E" ise mülga EİE akım gözlem istasyonlarını belirtmektedir).

2. Metot

Düşük akım frekans analizinin amacı, belirli bir sürede meydana gelen minimum akımların istatistiksel dağılımını analiz ederek, belirli düşük akım olaylarının tekrarlanma olasılığını tahmin etmektir. Bu bağlamda, incelenen kuraklık türüne göre farklı minimum

ortalama akım serileri kullanılmaktadır. Örneğin $d = 1$ günlük minimum akımlar yıl içindeki en düşük debi değerini ifade etmekte olup şiddetli-kısa süreli veya ani hidrolojik kuraklık tespitinde sıkça kullanılırken, $d = 7$ ve $d = 10$ günlük minimum akımlar ise genellikle orta vadeli hidrolojik kuraklık veya zirai kuraklık analizleri ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, uzun süreli hidrolojik kuraklıkların tespitinde $d = 15$ günlük minimum akımlar kullanılmakta olup elde edilen veriler bölgesel su kaynaklarının yönetimi açısından oldukça önem arz etmektedir.

Düşük akımların analizinde debi süreklilik çizgisi ve yıl içi debi-frekans çizgisi gibi çizgiler düşük akım dönemlerinde akarsudaki suyun kullanılması konusunda karar vermekte yardımcı olur [2]. Debi süreklilik çizgisi, bir akarsuyun belirli bir gözlem aralığı boyunca elde edilen günlük akım verilerine dayanarak yatay eksende aşılma yüzdesi ile düşey eksende debi olacak şekilde çizilen ve akarsuda farklı debi değerlerinin zaman içinde ne sıklıkla aşıldığını göstermektedir. Böylece akarsuda debinin genel karakteristiği belirlenerek farklı dönemlerde rejim değişimi veya dönemsel (yıllık, mevsimsel, vb.) etkileri incelenebilmektedir. Akarsuyun düşük akım ve kurak dönemlerindeki akım potansiyelini belirlemekte ise sıklıkla kullanılan yıl içi debi frekans çizgisi, bir hidrolojik yıl içerisinde herhangi bir *d*-günlük (örneğin $d = 10$) yıl içerisindeki en düşük akım değerlerinin frekans dağılımı ve bu dağılımlar kullanılarak herhangi bir debinin akarsuda ne sıklıkla görüleceğini analiz etmek için kullanılmaktadır. İlgili *d*-günlük yıllık ortalama minimum debiler belirlenip bu değerlerin artan değer sırasına göre dönüş aralıkları (*T*) denklem (1) ile belirlenebilmektedir.

$$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{n+1-2a}}{\mathrm{m-a}} \tag{1}$$

Burada *m* verinin sırasını, *n* gözlem yılı süresini, *a* ise verilerin uyduğu kabul edilen farklı olasılık dağılımları için değerler alan bir sabiti (örneğin Weibull dağılımı için $a = 0$ iken gamma dağılımı için $a = 0.5$ alınmaktadır) ifade etmektedir (ayrıntılı bilgi için bkz. Bayazıt ve Önöz [2]).

Düşük akımların istatistiksel anlamda yorumlanabilmesi için iki ve üç parametreli dağılım fonksiyonları ile mevcut verilerden tahminlerin yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada iki parametreli Log-Normal (LN2), Gamma (G2), Weibull (W2), Üstel (E2), Gumbel (GEV-I), Lojistik (L2) dağılımları ile üç parametreli GEV (GEV-III), Log-Normal (LN3), Pearson Tip III (P3), Log-Pearson Tip III (LP3) ve Genel Lojistik (GL3) olasılık dağılımları kullanılarak debiler incelenmiştir. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen olasılık dağılımları parametreleri L-momentleri yöntemi ile hesaplanmış olup bu dağılımların ait olasılık yoğunluk standart tanımlarıyla kullanılmıştır.

Gözlenen düşük akım verilerinin istatistiksel dağılımlar ile elde edilen ve belirli dönüş aralıklarına sahip teorik debi değerlerine uygunluğu Kolmogorov-Smirnov (K-S) testi ile kontrol edilmiştir. Bu test, gerçek veri ve teorik dağılım fonksiyonları arasındaki en büyük mutlak farkı (*d* istatistiği) ve buna karşılık gelen istatistiksel anlamlılığı (*p*-değeri) değerlendirmektedir.

Düşük akımların analizinde göz önüne alınan bir diğer istatistiksel durum ise, ölçülen zaman serisinde rastgele değişkenin değerinde istatistik anlamda sürekli bir değişme (trend) olup olmadığıdır. Trend analizi farklı istatistik testlerle gerçekleştirilmektedir. En güçlü testlerden biri olarak kabul edilen Mann-Kendall trend testi, parametrik olmayan bir analiz olup rastgele değişkenin dağılımından bağımsızdır. Bu sayede test çok farklı

veri setleri için uygulanabilmektedir. Mann-Kendall testi sonucunda zaman serilerindeki trendin varlığı *sıfır hipotezi* H_0 ile kontrol edilmektedir. Bu hipoteze göre denklem (2) ile elde edilen test istatistiği *Z*'nin mutlak değeri seçilen α anlamlılık düzeyine karşılık gelen standart normal dağılımın $Z_\alpha/2$ değerinden büyük ise ($|Z| > Z_\alpha/2$) sıfır hipotezi H_0 reddedilmekte, yani incelenen zaman serisinde trend olduğu sonucuna varılmaktadır. *Z*'nin pozitif değerleri artan bir trend olduğunu gösterirken negatif değerleri ise azalan bir trend olduğunu belirtmektedir.

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sigma_S, & S > 0 \\ 0 \quad\quad\quad , & S = 0 \\ (S+1)/\sigma_S, & S < 0 \end{cases} \tag{2}$$

Burada test istatistiği *S*, zaman serisindeki her bir veri çifti arasında yapılan karşılaştırmaların toplamı olup pozitif veya negatif değerler alarak eğilim yönünü göstermektedir. *S*'nin çok büyük veya çok küçük değerler alması trendin var olabileceği olasılığını güçlendirmektedir. Yukarıdaki denklemde görülen σ_S ise *S*'nin standart sapması olup denklem (3) ile elde edilmektedir:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} \tag{3}$$

Yue vd. [16], Mann-Kendall testinin gücü ile ilgili yaptıkları çalışmalar sonucunda bu testin parametrik olmamasına rağmen gücünün seçilen istatistiksel dağılımlara göre değiştiğini ortaya koymuştur. Ayrıca testin gücünün GEV Tip III dağılımı için en yüksek, Log-Normal dağılım için ise en düşük olduğunu; trendin eğiminin, örnek büyüklüğünün ve anlamlılık düzeyinin testin gücünü etkilendiği görülmüştür. Testin gücü üzerine yapılan çalışmalarda, iç bağımlılığın Mann-Kendall trend analizinin sonuçlarını etkilediği görülmüştür [2]. AR(1) modeli (denklem 4) ile yapılan Monte Carlo deneylerinde trend olmayan serilere uygulanan Mann-Kendall testinde iç bağımlılık arttıkça "trend yok" hipotezinin reddedilme olasılığı α düzeyinin çok üzerine çıkmaktadır [21].

$$x_i = \rho_1 x_{i-1} + \varepsilon_i \tag{4}$$

Denklem (4)'te ρ_1 zaman serilerinin 1-aralıklı serisel korelasyon katsayısını, ε_i ise kalıntı terimini ifade etmektedir. Önöz ve Bayazıt [22] çalışmasına göre ρ_1'in 0.5'e kadar değerlerinde örnek küçük olsa bile ($n = 20$) pre-whitening iç bağımlılığın etkisini gidererek H_0'ın reddedilme olasılığını α değerine düşürmektedir. $\rho_1 = 0.8$ gibi çok yüksek değerlerde $\alpha = 0.05$ için pre-whitening işleminden önce 0.40 olan ret olasılığı 0.12'ye düşmekte, büyük örneklerde (örneğin $n = 50$) 0.48'den 0.09'a düşüş görülmektedir. Bu sonuçlara göre trend olmayan serilerde pre-whitening sıfır hipotezi H_0'ın reddedilmesi olasılığını seçilen α değerine yaklaştırarak gerçekte olmayan bir trendin var olduğu sonucuna varılmasını engellemektedir.

Yue ve Wang [23] trend bulunan serilerde iç bağımlılığın Mann-Kendall testine etkisini gidermek için pre-whitening yapmanın uygun olmadığı sonucuna varmışlardır. Zira pre-whitening trend bulunan serilerde testin gücünü önemli oranda azaltmaktadır [2]. Pre-whitening'in söz konusu olumsuz etkilerine karşılık Yue ve Wang [14, 23] serisel korelasyon olan serilerde trend analizi için farklı bir yöntem önermişlerdir. Bu yönteme göre öncelikle trendin eğimi (*b*) belirlenmektedir ve trend ayrılmaktadır. Elde edilen ve trendi olmayan y_i serisinde pre-whitening uygulanarak serinin iç bağımlılığı giderilerek

Mann-Kendall testi ile trend analizi yapılmaktadır. Bu sayede iç bağımlılık giderilerek testin gücünün de azalmaması sağlanmaktadır.

Parametrik olmayan ve görsel açıdan sıkça kullanılan bir diğer yöntem ise yenilikçi trend analizidir [15]. Bu yöntemde zaman serisi ilk yarı (geçmiş dönem) ve ikinci yarı (yakın dönem) olmak üzere iki eşit parçaya ayrılarak her bir parçadaki değerler büyüklüklerine göre sıralanır ve karşılıklı olarak noktasal dağılım ile çizdirilir. Çizdirilen noktaların 1:1 doğrusuna göre grafikteki konumlarına göre analiz yapılır. Örneğin noktalar 1:1 eğrisinin üzerinde yer alıyorsa trendin olmadığı, yukarısında ve altında ise sırası ile artan ve azalan trend olduğu anlamına gelmektedir.

3. Bulgular

3.1. En uygun dağılımların belirlenmesi

Bu çalışmada, Seyhan Havzası **1801, 1817, 1820, 1825, 1826 ve 1827** numaralı ölçüm istasyonlarının (bkz. Şekil 1 ve Tablo 1) verileri kullanılarak elde edilen d =1, 7, 10 ve 15 günlük yıllık ortalama minimum debi değerleri ile düşük akım analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, açıklayıcı olması ve yer kısıtlamasının bulunması sebebiyle sadece 1827 numaralı ölçüm istasyonunda d = 7 ve d = 15 günlük yıllık ortalama minimum debiler sırası ile orta vadeli hidrolojik-zirai kuraklık ve uzun süreli kuraklıkların tespitinde kullanılması nedeni ile tercih edilmiş ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak verilmiştir. Tablo 3'te 1827 numaralı istasyona ait istatistiksel parametreler sunulmuştur.

Tablo 3. 1827 numaralı istasyona ait istatistiksel parametreler.

Parametre	$d = 7$	$d = 15$
Ortalama (μ_x)	7.22	7.47
Standart sapma (σ_x)	4.24	4.22
Medyan	5.54	5.88
Varyasyon katsayısı (c_{vx})	0.59	0.57
Çarpıklık katsayısı (c_{sx})	0.65	0.61
Kurtosis (k)	2.22	2.21

Bu çalışmada kullanılan Kolmogorov-Smirnov (K-S) uygunluk testinin sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Burada D istatistiği, gözlenen örneklem dağılım fonksiyonu ile belirli bir teorik dağılım fonksiyonu arasındaki maksimum mutlak farkı temsil etmekte olup istatistiğin küçük değerleri gözlenen verinin teorik dağılıma daha iyi uyduğunu göstermektedir. Buna karşılık, p-değeri, bu farkın istatistiksel olarak anlamlılığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Eğer $p < 0.05$ ise, sıfır hipotezi H_0 (veri teorik dağılıma uygundur) reddedilmekte ve teorik dağılımla uyumun zayıf olduğu sonucuna varılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre $d = 7$ ve $d = 15$ günlük minimum debiler için LN2 ve P3 dağılımlarının p-değerinin en yüksek olduğu, D-değerinin ise en düşük olduğu görülmektedir. G2, E2, LP3 ve LN3 dağılımlarının gözlem verilerini oldukça iyi temsil ettiği tespit edilmiştir. Genel olarak, 1827 numaralı istasyonda LN2 ve P3 dağılımları, minimum debilerin zaman serisi için en uygun dağılımlar olarak öne çıkmaktadır.

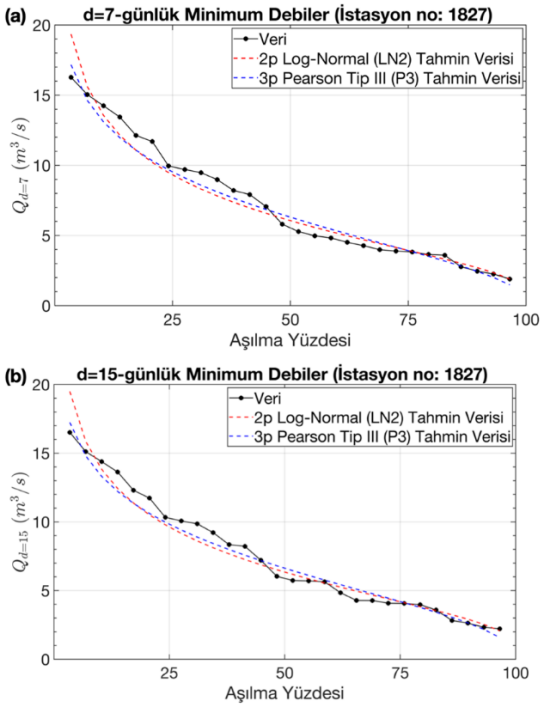
Düşük akımların ne sıklıkla aşıldığını belirten debi süreklilik çizgisi Şekil 2'de görülmektedir. Burada, ölçüm verilerinin tahmininde kullanılan olasılık dağılımlarından Kolmogorov-Smirnov (K-S) testine göre gerçek veriyi en iyi tahmin ettiği belirlenen LN2

ve P3 dağılımları ile tahmin edilen debi değerleri de ayrıca (bkz. Tablo 5) verilmiştir. Şekil 2 ve Tablo 5'te görüldüğü üzere LN2 ve P3 dağılımları mevcut zaman serilerini oldukça iyi temsil ederken, yüksek aşılma olasılıklı debilerde LN2 dağılımı gözlem verilerini çok daha başarılı bir şekilde tahmin etmektedir. K-S testi sonuçlarında da görüldüğü üzere LN2 dağılımının bu istasyonda düşük akımların istatistiğinde daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4. $d = 7$ ve $d = 15$ günlük minimum debiler için Kolmogorov-Smirnov (K-S) testi sonuçları (sadece sıfır hipotezi H_0'ın reddedilmediği dağılımlar verilmiştir).

Dağılım Tipi	*p*-değeri		*D*-değeri	
	$d = 7$	$d = 15$	$d = 7$	$d = 15$
2 parametreli Log-Normal (LN2)	0.96	0.94	0.09	0.10
Weibull (W2)	0.59	0.69	0.14	0.13
Üstel (E2)	0.85	0.82	0.11	0.11
Gamma (G2)	0.89	0.92	0.11	0.10
3 parametreli Log-Normal (LN3)	0.84	0.87	0.11	0.11
Genel Ekstrem Değer (GEV3)	0.82	0.84	0.12	0.11
Pearson Tip III (P3)	0.91	0.93	0.09	0.10
Log-Pearson Tip III (LP3)	0.89	0.91	0.11	0.10

Zamanın belirli yüzdelerinde aşılan Q_i debileri (i indisi yüzdeyi ifade etmektedir) ise Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere %50 ve %75 aşılma olasılıklı debiler her iki dağılımda da yaklaşık değerler almaktadır. Fakat aşılma olasılığı arttıkça, bir diğer deyişle düşük akımlarda LN2 dağılımı hem $d = 7$ hem de $d = 15$ günlük ortalama gözlem verileri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

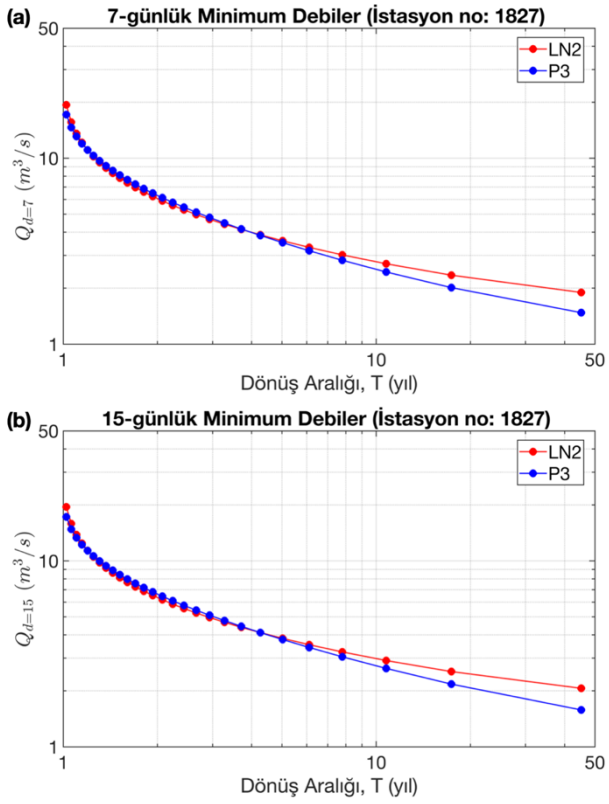


Şekil 2. 1827 no'lu istasyon için yıllara göre debi süreklilik eğrileri. (a) $d = 7$ günlük minimum debiler; (b) $d = 15$ günlük debiler.

Tablo 5. 1827 numaralı istasyona ait gözlem ve %50, %75, %90 ve %95 aşılma olasılıklı (sırası ile Q_{50}, Q_{75}, Q_{90} ve Q_{95}) tahmin debileri (m^3/s).

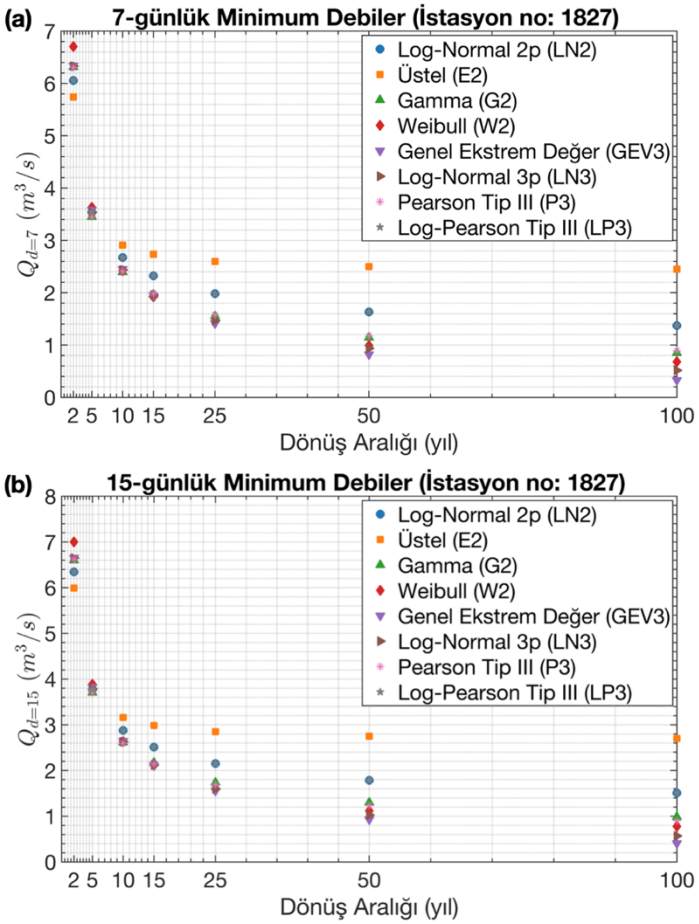
Veri Tipi	$d = 7$ gün				$d = 15$ gün			
	Q_{50}	Q_{75}	Q_{90}	Q_{95}	Q_{50}	Q_{75}	Q_{90}	Q_{95}
Gözlem	5.54	3.84	3.40	2.06	5.89	4.07	2.60	2.27
LN2 tahmin	6.09	3.93	2.67	2.10	6.35	4.18	2.87	2.28
P3 tahmin	6.06	3.92	2.40	1.71	6.63	4.20	2.60	1.85

Şekil 2'de de belirtildiği üzere (ayrıca bkz. Tablo 5) ölçüm verilerini en iyi temsil ettiği belirlenen LN2 ve P3 dağılımları için farklı T dönüş aralıklarına (Denklem 1) sahip günlük debiler hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ile düşük akımların bir ölçüm noktasında ne kadar sıklıkla görüleceğinin anlaşılması için kullanılan debi-frekans eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3). Hem $d = 7$ hem de $d = 15$ günlük yıllık ortalama minimum debiler için her iki dağılım da dönüş aralığı arttıkça mevcut zaman serilerine kıyasla daha düşük debiler tahmin etmektedir. Büyük dönüş aralıkları genellikle ekstrem kurak dönemleri temsil ettiği için bu beklenen bir sonuçtur. LN2 ve P3 dağılımları birbirine çok yakın debiler tahmin ederken uzun dönüş aralıklarında (örneğin $T \geq 15$) LN2 dağılımının gözlem verilerine P3 dağılımından daha büyük debiler tahmin ettiği görülmektedir. Bu sonuç, uygunluk testleri sonucunda gerçek veriyi oldukça iyi temsil ettiği görülen dağılımların, kurak dönem analizinde özellikle uzun dönüş aralıklarında farklı değerler tahmin ettiklerinin debi-frekans eğrileri ile tespit edilebileceğini göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 3. 1827 no'lu istasyonu için debi-frekans eğrileri. (a) d = 7 günlük minimum debiler; (b) d = 15 günlük minimum debiler.

Bu çalışma kapsamında birçok 2 parametreli ve 3 parametreli istatistik dağılımlar ile düşük akımların analizi yapılmış olup, bunlardan 2 parametreli Lojistik (L2) ve Gumbel (G2) dağılımları ile 3 parametreli Genel Lojistik (GL3) dağılımlarının yüksek dönüş aralıkları için negatif değerleri vermesi nedeniyle bu dağılımlar mevcut çalışmada sunulmamıştır. Diğer olasılık dağılımları ile 1827 no'lu istasyonda tahmin edilen ve T = 2, 5, 10, 15, 25, 50 ve 100 yıl dönüş aralıklı $d = 7$ ve $d = 15$ günlük yıllık ortalama minimum debiler Şekil 4'te sunulmuştur. Burada görüldüğü üzere yüksek dönüş aralıklı tahminlerde (özellikle $T > 25$ yıl) dağılımların tahminleri arasındaki fark artmaktadır. Bunlardan LN2 ve LP3 dağılımları uzun dönüş aralıklarında diğer dağılımlara kıyasla daha yüksek debi tahminleri sunarken GEV ve P3 dağılımları özellikle uzun dönüş aralıklarında daha düşük debi değerleri öngörmektedir. Fakat, dikkat çekici bir şekilde, LN2 dağılımı $T > 15$ yıllık dönüş aralıkları için istasyon gözlem verilerine diğer dağılımlara göre daha yakın tahminler üretmiş, bu da yüksek dönüş aralıklarında LN2 dağılımının performansının güçlü olduğunu düşündürmüştür. Öte yandan, daha düşük dönüş aralıklarında (örneğin $T < 10$), P3 dağılımı gözlem verilerine daha yakın sonuçlar elde etmektedir. Bu durum, dağılımların farklı dönüş aralıklarında farklı performanslar sergilediğini ve tek bir dağılımın tüm dönüş aralıkları için en uygun sonucu veremeyebileceğini düşündürtmektedir. Bu durum, verileri en iyi temsil eden olasılık dağılımının belirlenmesi için uygunluk testlerinin yapılmasının hidrolojik anlamlılık ve güvenilirlik açısından önemini göstermektedir.



Şekil 4. 1827 no'lu ölçüm istasyonunda ölçülen (a) *d = 7* günlük ve (b) *d = 15* günlük yıllık ortalama minimum debiler kullanılarak farklı olasılık dağılımları ile elde edilen *T* = 2, 5, 10, 15, 25, 50 ve 100 yıl dönüş aralıklı tahmin debileri.

3.2. Trend analizi

Şekil 5'te 1827 no'lu istasyona ait yıllık minimum debilerin zamansal değişimi gösterilmektedir. Burada ölçüm verileri ile bu verilerin zamana bağlı değişimi (trendini veya eğilimini) verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere 1988 yılından 2015 yılına kadar 1827 no'lu istasyondan elde edilen $d = 7$ ve $d = 15$ günlük minimum ortalama debiler zamanla azalma eğilimi göstermektedir. Dolayısı ile, bu istasyonda düşük akım analizi ve buna bağlı olarak olası kuraklık risklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Ayrıca trend testi yapılmasının da istasyondaki mevcut trendin analiz edilmesi için gerekli olduğu görülmektedir.

Bir akım verisindeki zamana bağlı eğilimlerin (trendlerin) belirlenmesi, düşük akım karakteristiklerinin uzun dönem değişimlerini değerlendirmek açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda, mevcut çalışmada 3 farklı trend testi yapılmıştır ve sonuçları Tablo 6-7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, TFPW trend testi sonuçları $d = 7$ günlük minimum yıllık ortalama debiler için (Tablo 6) şu şekilde özetlenebilir:

- Testin P değeri trendin rastlantısal olma olasılığını göstermektedir. $\alpha = 0.05$ anlamlılık düzeyi için $P < \alpha$ olup, bu durum H_0 hipotezinin reddedildiğini, bir diğer deyişle trendin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.
- Test istatistiği S'nin yüksek değerleri trendin var olma olasılığını güçlendirir. Bu istasyonda $S = -149.0$ olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile azalan bir trendin var olabileceği sonucuna varılmıştır.
- Kendall korelasyon katsayısı τ, veriler arasındaki korelasyon derecesini, yani trendin gücünü ifade etmektedir. $\tau = \pm 1$ güçlü artan/azalan ilişkiyi, $\tau = 0$ ise veriler arasında herhangi bir ilişki olmadığını ifade etmektedir. Burada, $\tau = -0.43$ veriler arasında orta düzeyde güçlü bir azalan korelasyon olduğunu göstermekte olup bu sonucun diğer test çıktıları ile uyumlu olduğu görülmektedir.
- S istatistiğinin beklenen dağılımına göre varyansını ifade eden σ_s Z değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır (bkz. Denklem 2)

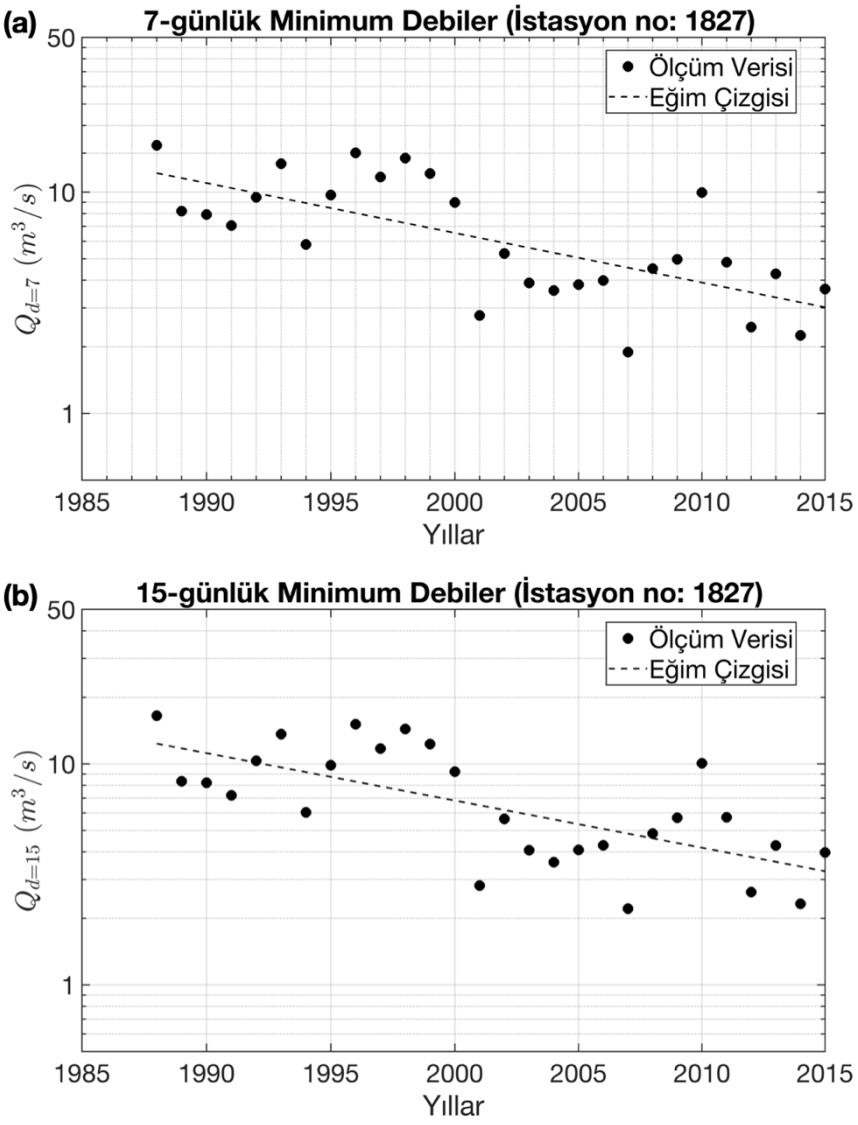
$Z = -3.09$ değeri normal dağılıma göre oldukça uç bir değer olup $\alpha = 0.05$ anlamlılık düzeyinde (%95 güven düzeyinde) okunan $Z_{\alpha/2} = \pm 1.96$ değeri ile kıyaslandığında $|Z| > Z_{\alpha/2}$ olduğu için sıfır hipotezi H_0 reddedilmekte ve negatif bir trendin varlığı oldukça güçlü bir şekilde desteklenmektedir.

Tablo 6. 1827 no'lu ölçüm istasyonunda elde edilen $d = 7$ günlük akım verileri için gerçekleştirilen trend testleri.

Test	Z	p	τ	S	Trend yönü
MK	-3.38	0.001	-0.46	-172	Azalan
TFPW	-3.09	0.002	-0.43	-149	Azalan

Tablo 7. 1827 no'lu ölçüm istasyonunda elde edilen $d = 15$ günlük akım verileri için gerçekleştirilen trend testleri.

Test	Z	p	τ	S	Trend yönü
MK	-3.33	0.001	-0.45	-0.29	Azalan
TFPW	-3.35	0.002	-0.46	-0.26	Azalan



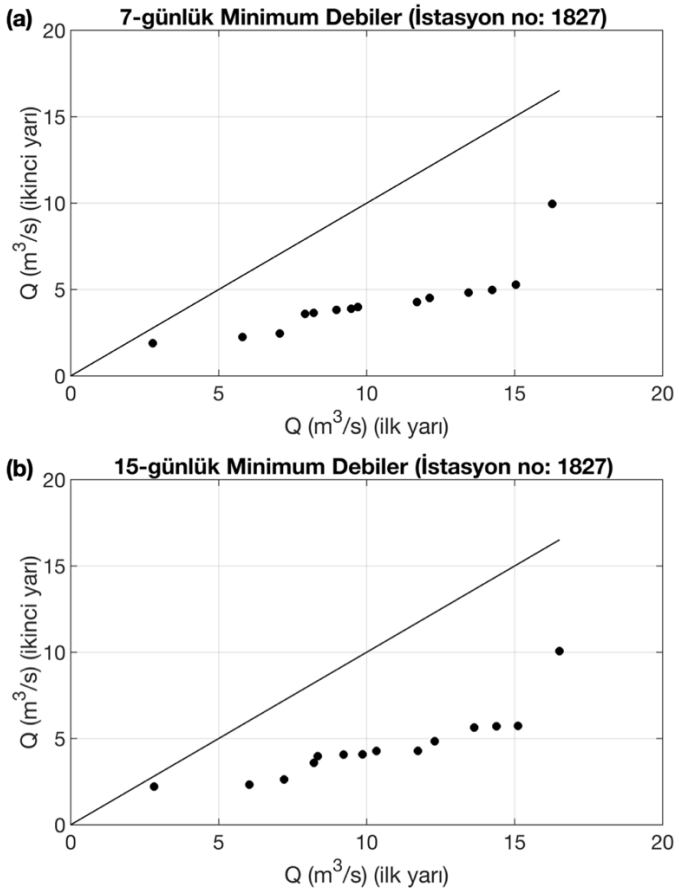
Şekil 5. 1827 numaralı ölçüm istasyonunda elde edilen d günlük minimum debilerin yıllara göre değişimi. (a) $d = 7$ günlük minimum debiler; (b) $d = 15$ günlük debiler.

Bir zaman serisindeki otokorelasyonun etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmak için gerçekleştirilen pre-whitening işlemi, klasik Mann-Kendall testine göre daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu nedenle iç bağımlılığın tespiti için otokorelasyon analizinin yapılması önerilmektedir. 1827 no'lu istasyon için zaman serilerine iç bağımlılık testleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere iç bağımlılık katsayısı her iki durumda da $\rho_1 \approx 0.55$ olup bu değer üst sınır olan $\rho_{1,max} = 0.378$'den büyük olduğu için istatistiksel olarak anlamlı bir iç bağımlılık olduğunu göstermektedir. Bu durum, veri setinde bağımsızlık varsayımının geçerli olmadığını, dolayısıyla bazı trend testlerinde (örneğin, bu çalışmada, Mann-Kendall trend testi) pre-whitening yapılması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 8. 1827 numaralı ölçüm istasyonunda elde edilen $d = 7$ ve $d = 15$ günlük akımlar için iç bağımlılık testi sonuçları (ρ_1 zaman serilerinin 1-aralıklı serisel korelasyon katsayısını belirtmektedir).

d günlük debi	Korelasyon katsayısı (ρ_1)	Üst sınır ($\rho_{1,max}$)	Alt sınır ($\rho_{1,min}$)
7	0.546	0.378	-0.378
15	0.548	0.378	-0.378

Ölçüm verilerine bir diğer önemli trend analizi olan yenilikçi trend analizi (ITA) [15] uygulanarak elde edilen sonuçlar Şekil 6'da ve Tablo 9'da verilmiştir. Burada ortalama farkların negatif olması, verilerin ikinci yarısındaki (yakın dönemdeki) değerlerin ilk yarıdaki (geçmiş dönem) değerlere kıyasla daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Trendin şiddetini belirten trend yüzdesi ise debilerin negatif yönde ciddi anlamda azaldığını, neredeyse iki kat düşüş olduğunu göstermektedir. Tüm d-günlük debi değerlerindeki bu trend, düşük akımların yakın zamanda önemli oranda göz ardı edilemeyecek miktarda düştüğünü göstermektedir. Bu sonuç hidrolojik kuraklık yönünden değerlendirildiğinde hem kısa hem de uzun vadede düşük akımların azalmakta olduğunu ortaya koymaktadır. $d = 7$ günlük minimum debilerdeki azalış içme suyu rezervleri ve çevresel akımlar için kritik bir uyarı teşkil etmektedir. $d = 15$ günlük minimum debilerdeki ciddi azalış ise ekosistem sürdürülebilirliği, tarımsal kaynakların ve baraj rezervlerinin yönetimi açısından ciddi risklerin habercisidir.



Şekil 6. 1827 no'lu ölçüm istasyonunda ITA kullanılarak elde edilen sonuçlar. (a) d = 7 günlük, (b) d = 15 günlük minimum debiler (•: Ölçüm verileri. Siyah eğri: 1:1 eğim çizgileri).

Tablo 9. 1827 numaralı ölçüm istasyonunda ITA kullanılarak elde edilen sonuçlar.

d günlük debi	Ortalama fark	Trend yüzdesi (%)	Trend yönü
7	-5.96	-82.52	Azalan
15	-5.88	-78.70	Azalan

Bu bölümde anlatılan tüm analizler, daha önce belirtildiği üzere Seyhan Havzası 1801, 1817, 1820, 1825 ve 1826 numaralı ölçüm istasyonları için de gerçekleştirilmiştir. Bulgular bölümünde ayrıntılı olarak incelenen 1827 numaralı istasyon haricindeki istasyonlar için $d = 7$ günlük yıllık ortalama minimum debiler kullanılarak hesaplanan istatistiksel parametreler Tablo 10'da; MK ve ITA trend testlerinin sonuçları ise sırası ile Tablo 11 ve 12'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, diğer istasyonlarda ayrıca LN2 ve P3 dağılımları dışında LN3 ve GEV dağılımlarının da ölçüm verilerini oldukça başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür. 1820 numaralı ölçüm istasyonunda ise $d = 7$ günlük minimum debileri 2 parametreli W2 dağılımının; $d = 15$ günlük minimum debilerini ise LP3 dağılımının temsil ettiği görülmüştür. Fakat burada K-S testi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde p-değerlerinin oldukça yakın olduğu, zaman serilerini diğer istasyonlarda olduğu gibi LN3, P3 ve GEV dağılımlarının başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir. Trend analizi sonuçlarına göre seçilen $\alpha = 0.05$ anlamlılık düzeyinde 1801, 1817 ve 1825 numaralı istasyonlarda anlamlı bir trend bulunmamaktadır. Fakat, özellikle, 1817 ve 1825 numaralı istasyonlarda ölçülen debilerin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0.1$ için 1825 numaralı ölçüm istasyonunda azalan yönde anlamlı bir trend olduğu da görülmüştür. Dolayısı ile bu istasyonlarda kuraklık riskinin olmadığı sonucuna varılması hidrolojik açıdan anlamlı değildir. Nitekim ITA testi sonuçlarına göre incelenen tüm istasyonlarda, 1827 numaralı istasyonda olduğu gibi (farklı şiddetlerde olsa da), azalan bir trend tespit edilmiştir.

Tablo 10. Ölçüm istasyonlarına ait istatistiksel parametreler ($d = 7$ günlük yıllık ortalama minimum debiler).

Parametre	İstasyon numarası				
	1801	1817	1820	1825	1826
Ortalama (μ_x)	11.36	0.48	2.67	1.77	32.97
Standart sapma (σ_x)	1.41	0.22	1.12	0.40	6.12
Medyan	11.37	0.54	2.63	1.75	33.66
Varyasyon katsayısı (c_{vx})	0.12	0.46	0.42	0.20	0.19
Çarpıklık katsayısı (c_{sx})	0.13	-0.43	0.18	-0.23	-0.49
Kurtosis (k)	2.45	2.33	2.78	2.49	3.67

Tablo 11. Ölçüm istasyonlarına ait $d = 7$ günlük yıllık ortalama minimum debiler için gerçekleştirilen trend testleri.

İstasyon numarası	MK					TFPW				
	Z	p	τ	S	Trend	Z	p	τ	S	Trend
1801	-2.40	0.98	-0.01	20	Yok	0.69	0.49	0.11	27	Yok
1817	-0.98	0.33	-0.17	-29	Yok	-0.53	0.60	-0.10	-15	Yok
1820	-2.89	0.00	-0.39	-147	Azalan	-2.46	0.01	-0.34	-119	Azalan
1825	-1.89	0.06	-0.26	-97	Yok	-1.84	0.07	-0.26	-89	Yok
1826	-2.39	0.02	-0.32	-122	Azalan	-2.33	0.02	-0.32	-113	Azalan

Tablo 12. Ölçüm istasyonlarına ait $d = 7$ günlük yıllık ortalama minimum debiler için gerçekleştirilen ITA testi sonuçları.

İstasyon numarası	Ortalama fark	Trend yüzdesi (%)	Trend yönü
1801	-0.30	-2.67	Azalan
1817	-0.03	-6.32	Azalan
1820	-1.44	-53.78	Azalan
1825	-0.35	-19.49	Azalan
1826	-7.06	-21.40	Azalan

4. Sonuçlar ve tartışma

Seyhan Havzası'nda gerçekleştirilen düşük akım analizlerinde kısa, orta ve uzun vadeli kuraklık tespiti için d = 1, 7, 10 ve 15 günlük yıllık ortalama minimum debi değerleri kullanılarak düşük akım frekans analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bunlardan $d = 7$ ve $d = 15$ günlük yıllık ortalama minimum debileri sırası ile orta vadeli-zirai ve uzun sürekli kuraklıkları temsil ettikleri için, çalışma kapsamında daha ayrıntılı incelenmiştir.

Ölçüm verilerinin istatistiksel analizini gerçekleştirmek amacıyla iki parametreli Log-Normal (LN2), Gamma (G2), Weibull (W2), Üstel (E2), Gumbel (GEV-I), Lojistik (L2) dağılımları ile üç parametreli GEV (GEV-III), Log-Normal (LN3), Pearson Tip III (P3), Log-Pearson Tip III (LP3) ve Genel Lojistik (GL3) dağılımları kullanılarak farklı dönüş aralıklarına sahip düşük akım tahminleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tahmin debilerine Kolmogorov-Smirnov (K-S) uygunluk testi uygulanarak, bu dağılımlardan hangilerinin mevcut zaman serilerini en iyi şekilde temsil ettiği analiz edilmiştir. 1827 numaralı istasyonda LN2 ve P3 dağılımlarının zaman serilerini oldukça iyi tahmin ettiği görülürken, 1801, 1817, 1820, 1825 ve 1826 numaralı istasyonlarda özellikle P3, LN3 ve GEV dağılımlarının en iyi sonuçları verdikleri görülmüştür. Buna bağlı olarak, dağılımların farklı dönüş aralıklarında ve farklı istasyonlarda gösterdikleri performansın değiştiği ve Seyhan Havzası'nda tek bir dağılım ile her ne kadar en uygun sonuçların alınamayacağı tespit edilse de P3, LN3 ve GEV dağılımlarının performansının en yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Önöz ve Bayazıt [8], Eriş vd. [9] ve Yılmaz vd. [10] gibi çalışmaların bulguları ile de oldukça uyumludur.

Çalışma kapsamında son olarak, düşük akımlardaki zamana bağlı değişimin (trend) belirlenmesi için Mann-Kendall (MK), Trend-Free Pre-Whitening (TFPW) ve yenilikçi trend analizi (ITA) testleri uygulanmıştır. Bu testlerin sonucunda 1801, 1817 ve 1825 numaralı ölçüm istasyonlarında anlamlı bir trend olmadığı tespit edilmiş olsa da özellikle 1817 ve 1825 numaralı istasyonlarda ölçülen debilerin çok düşük değerlerde olduğu; dolayısı ile bu istasyonlarda kuraklık riskinin bulunmadığı sonucuna varılamayacağı görülmüştür. 1820, 1826 ve 1827 numaralı istasyonlarda ise azalan bir trend olduğu görülmüştür. Bununla birlikte seçilen anlamlılık düzeyinde MK ve TFPW trend testleri ile anlamlı bir trend bulunamayan istasyonlar da dahil olmak üzere incelenen istasyonların tamamında ITA ile azalan bir trend tespit edilmiştir. Bu bulgular ışığında, son yıllarda etkisi artan küresel iklim değişikliği de göz önüne alındığında, Seyhan Havzası'nda özellikle orta vadeli kuraklık riskinin mevcut olduğu sonucuna varılmıştır. Ülkemizdeki mevcut su kaynaklarının yönetimi açısından farklı havzalarda da bu tür çalışmaların yapılması oldukça önemlidir. Güncel verilerle çalışarak gerçekleştirilecek

düşük akımların analizinin, özellikle iklim değişikliği de göz önüne alındığında, daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

[1] Yevjevich, V., Methods for determining statistical properties of droughts, **Coping with droughts**, Water Resources Publications, 22-43, Colorado, (1983).

[2] Bayazıt, M. ve Önöz, B., **Taşkın ve Kuraklık Hidrolojisi**, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, (2008).

[3] Vogel, R. M. ve Kroll, C. N., Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics, **Water Resources Research, 28**, 9, 2451-2458, (1992).

[4] Mishra, A. K. ve Singh, V. P., Drought modeling-a review, **Journal of Hydrology, 403**, 1-2, 157-175, (2011).

[5] Smakhtin, V. U., Low flow hydrology: a review, **Journal of Hydrology, 240**, 3-4, 147-186, (2001).

[6] Tallaksen, L. M. ve Van Lanen, H. A., **Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater**, 2. basım, Elsevier, Cambrigde, (2023).

[7] Laaha, G. ve Blöschl, G., A comparison of low flow regionalisation methods-catchment grouping, **Journal of Hydrology, 323**, 1-4, 193-214, (2006).

[8] Önöz, B. ve Bayazıt, M., GEV-PWM model for distribution of minimum flows, **Journal of Hydrologic Engineering, 4**, 3, 289-292, (1999).

[9] Eriş, E., Aksoy, H., Önöz, B., Çetin, M., Yüce, M. İ., Selek, B., Aksu, H., Burgan, H. İ., Eşit, M., Yıldırım, I. ve Ünsal Karakuş, E., Frequency analysis of low flows in intermittent and non-intermittent rivers from hydrological basins in Turkey, **Water Supply, 19**, 1, 30-39, (2019).

[10] Yılmaz, S. U., Çiltaş, E., Eldayıh Kanber, Y., Bakar, H., Öz, M., Kaçar, F. S. ve Önöz, B., Seyhan Havzası etrafında düşük akım frekans analizi ve kurak dönem analizi, **12. Ulusal Hidroloji Kongresi**, 301-311, Samsun, (2024).

[11] Massey, F. J. J., The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit, **Journal of the American Statistical Association, 46**, 253, 68-78, (1951).

[12] Anderson, T. W. ve Darling, D. A., Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes, **The Annals of Mathematical Statistics**, 193-212, (1952).

[13] Kroll, C. N. ve Vogel, R. M., Probability distribution of low stream-flow series in the United States, **Journal of Hydrologic Engineering, 7**, 2, 137- 146, (2002).

[14] Yue, S. ve Wang, C., The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series, **Water Resources Management, 18**, 3, 201–218, (2004).

[15] Şen, Z. Innovative trend analysis methodology, **Journal of Hydrologic Engineering, 17**, 9, 1042-1046, (2012).

[16] Yue, S., Pilon, P. ve Cavadias, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series, **Journal of Hydrology, 259**, 1-4, 254-271, (2002).

[17] Burn, D. H. ve Elnur, M. A. H., Detection of hydrologic trends and variability, **Journal of Hydrology, 255**, 1-4, 107-122, (2002).

[18] Özfidaner, M., Şapolyo, D. ve Topaloğlu, F., Hydrological drought analysis of streamflow data in Seyhan basin, **Journal of Soil Water, 7**, 1, (2018).

[19] Altın, T. B., Sarış, F. ve Altın, B. N., Determination of drought intensity in Seyhan and Ceyhan River basins, Turkey, by hydrological drought analysis, **Theoretical and Applied Climatology, 139**, 95-107, (2020).

[20] Terzi, T. B. ve Önöz, B., Drought analysis based on nonparametric multivariate standardized drought index in the Seyhan River basin, **Natural Hazards**, 1-28, (2025).

[21] Von Storch, H. and Navarra, A., Misuses of statistical analysis in climate research, **Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques**, Springer-Verlag, New York, 11-26, (1995).

[22] Önöz, B. ve Bayazıt, M., The power of statistical tests for trend detection, **Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, 27**, 4, 247-251, (2003).

[23] Yue, S. ve Wang, C. Y., Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test, **Water Resources Research, 38**, 6, 4-1-4-7, (2002).

DOI:10.25092/baunfbed. 1676679 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 736-749, (2025)*

A fast and reliable numerical approach for solving lake pollution problem

Sevin GÜMGÜM*

İzmir University of Economics Faculty of Arts and Sciences, Department of Mathematics, İzmir/Türkiye.

Geliş Tarihi (Received Date): 15.04.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 29.05.2025

Abstract

Just like air, water is an essential component of the environment and deterioration of water sources threatens all living organisms. Hence, investigating the water pollution problem is highly important. Lakes constitutes a big portion of water sources. The aim of this study is to analyze the dynamics of pollution in a system of three interconnected lakes using the Gegenbauer wavelet method. The problem is modeled by three ordinary linear differential equations representing the rate of pollution in each lake with respect to time. Time derivates are approximated by the truncated Gegenbauer wavelet series and the system of differential equations are converted into a system of algebraic equations. We show that the proposed technique is reliable and fast by comparing the numerical results with other numerical results available in the literature. We also show that the method is highly accurate and hence can also be used to solve other ecological phenomena as well.

Keywords: *Lake contamination, water pollution, gegenbauer wavelets.*

Göl kirliliği probleminin çözümü için hızlı ve güvenilir bir sayısal yaklaşım

Öz

Su, hava gibi çevrenin temel bileşenlerinden biridir ve su kaynaklarının bozulması tüm canlı organizmaları tehdit etmektedir. Bu nedenle su kirliliği sorununu araştırmak büyük önem taşımaktadır. Göller, su kaynaklarının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, üç adet birbiriyle bağlantılı gölden oluşan bir sistemdeki kirlilik dinamiklerini Gegenbauer dalgacık yöntemi ile analiz etmektir. Problem, her bir göldeki kirlilik oranının zamana göre değişimini temsil eden üç doğrusal diferansiyel denklem sistemi ile modellenmiştir. Zaman türevlerine, kesikli Gegenbauer dalgacık serisiyle yaklaşılmış ve diferansiyel denklem sistemi, cebirsel denklem sistemine dönüştürülmüştür.

* Sevin GÜMGÜM, sevin.gumgum@ieu.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-0594-2377

Elde edilen sayısal sonuçlar, literatürde mevcut diğer sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen tekniğin güvenilir ve hızlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, yöntemin yüksek doğruluk sağladığı ve bu nedenle diğer ekolojik olayların çözümünde de kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: *Göl kirlenmesi, su kirliliği, gegenbauer dalgacıkları.*

1. Introduction

Water is a source of life and is one of the most important parts of the environment. We can classify water sources as surface and ground water sources. Dams, rivers and lakes can be listed among surface water sources, and they meet the industrial, agricultural, and domestic water demand. The availability of these sources is diminishing due to discharges of untreated wastewater. Thus, it is important to observe water pollutants and their effects regularly. Since lakes constitutes a big portion of domestic water usage, pollution of them may have devastating effects on daily life. Hence, this problem has attracted attention of many researchers. Several numerical and analytical methods are introduced for the solution of the problem. These methods can be listed as follows: compartment modeling [1], q-homotopy analysis transform method [2], Bernoulli Ritz-collocation method [3], homotopy perturbation method, Laplace transform and Padé approximants [4], Bessel polynomials [5], Laplace transform method [6], Boubaker collocation method [7], modified differential transform method [8], semianalytical method [9], Laplace-Adomian decomposition method [10], Taylor series method [11] and the variational iteration method [12].

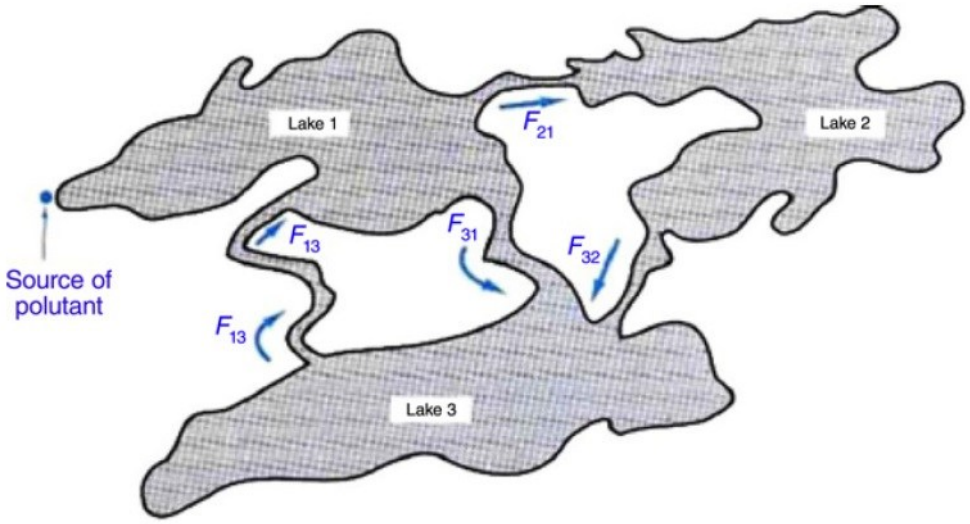


Figure 1. System of three lakes with interconnecting channels [1].

In this study, we analyze a mathematical model that describes the dynamics of pollution in a system of three inter-connected lakes given in Fig.1. Biazar *et al.* [1] introduced a series of simplifying assumptions to provide a foundation for the development of the governing equations. First, each lake is considered as a large and well-mixed separate division connected by channels that are treated as pipes, facilitating fluid flow. The direction of the fluid flow within these channels is indicated by arrows. It is assumed that

the pollutant is uniformly distributed throughout each lake due to effective mixing processes. The water volume (V_k) in each lake is considered to be constant over time. The nature of the pollution is regarded as permanent, with no transformation into other forms occurring. Initially, none of the lakes contain any pollution. The rate of change in the concentration of pollutant in a lake is equal to the rate at which pollutants flow into the lake minus the rate at which pollutants flow out of the lake.

The motivation of this study is to explore the levels of pollution in each lake at any specified time. In order to do that, we solve the model by using the Gegenbauer wavelet method. Wavelet methods are known to be effective methods and result in accurate solutions [13–20]. In Section 2, we introduce the governing equations of the model and explain the problem parameters. Section 3 is reserved for the definition and application of the Gegenbauer wavelets. In the 4th section, we give the numerical results and discussion. Finally in section 5, we give the conclusion of the study.

1. Governing equations

The pollution dynamics within the three-lake system following the assumptions are given as in [1]

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{F_{13}}{V_3}X_3(t) - \frac{F_{31}}{V_1}X_1(t) - \frac{F_{21}}{V_1}X_1(t) + p(t)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{F_{21}}{V_1}X_1(t) - \frac{F_{32}}{V_2}X_2(t) \qquad 0 \le t \le b \qquad (2.1)$$

$$\frac{dX_3}{dt} = \frac{F_{31}}{V_1}X_1(t) + \frac{F_{32}}{V_2}X_2(t) - \frac{F_{13}}{V_3}X_3(t)$$

with the initial conditions

$$X_1(0) = r_1, \quad X_2(0) = r_2, \quad X_3(0) = r_3.$$

Here, $p(t)$ represents the rate of pollutant discharged into Lake 1. This function may remain constant or vary over time, reflecting changes in the pollutant input. $X_k(t)$ and V_k denote the amount of pollution in the lake k ($k = 1,2,3$) at any time $t \ge 0$ and the volume of water, respectively. The term $\frac{X_k(t)}{V_k}$ represents the concentration of pollution in lake k at any time. Furthermore F_{mk} represents the flow rate from lake k to lake m. $\frac{F_{mk}}{V_k}X_k(t)$ is the pollutant flow that V_k measures the rate at which the pollutant concentration in the lake k flows into the lake m at time t.

Since the volume of each lake is assumed to remain constant, the inflow rate to each lake must be equal to the outflow rate. Hence, the flow rate for each lake can be written as follows

$Lake\ 1$: $F_{13} = F_{21} + F_{31}$

$Lake\ 2: F_{21} = F_{32}$

$Lake\ 3: F_{13} = F_{31} + F_{32}$

The flow rate $F_{13}, F_{21}, F_{31}, F_{32}$ and the water volume V_1, V_2, V_3 are appropriate constants.

2. Gegenbauer wavelets and their applications

Gegenbauer wavelet technique is a powerful numerical tool based on the Gegenbauer polynomials and has a broad applicability across fields that require accurate solutions of differential equations with complex boundary and initial conditions. Wavelet methods, including the Gegenbauer wavelet approach, are quite popular to solve complex problems requiring high precision.

2.1. Gegenbauer polynomials:

Gegenbauer polynomials, $G_m^{\gamma}(t)$, also known as the ultraspherical harmonic polynomials of order $m \in \mathbb{Z}^+$, are defined over the interval $[-1,1]$ by using the following recurrence formula [14]

$$G_{m+1}^{\gamma}(t) = \frac{1}{m+1}\Big(2(m+\gamma)tG_m^{\gamma}(t) - (m+2\gamma-1)G_{m-1}^{\gamma}(t)\Big), \quad \text{for } m = 1,2,\ldots$$

where $G_0^{\gamma}(t) = 1$ and $G_1^{\gamma}(t) = 2\gamma t$. Here, m is the order of the polynomial, $\gamma > -1/2$ is the ultraspherical parameter. Different values of γ offer different polynomials, i.e $\gamma = 1/2$ refers to the Legendre polynomials, $\gamma = 0$ and $\gamma = 1$ refer to the first and second types of Chebyshev polynomials, respectively. These polynomials satisfy the orthogonality relation with respect to the weight function $(1-t^2)^{\gamma-(\frac{1}{2})}$ and form an orthogonal basis for the Hilbert space $L^2[-1,1]$

$$\int_{-1}^{1} \frac{1}{(1-t^2)^{\frac{1}{2}-\gamma}} G_m^{\gamma}(t)G_n^{\gamma}(t)dt = L_m^{\gamma}(t)\delta_{mn},$$

where $L_m^{\gamma}(t) = \frac{\pi 2^{1-2\gamma}\Gamma(m+2\gamma)}{m!(m+\gamma)(\Gamma(\gamma))^2}$ is the normalizing factor and δ is the Kronecker delta function, [14].

2.2. Gegenbauer wavelets

Gegenbauer wavelets are expressed as $\psi_{r,m}(t) = \Psi_{(l,r,m,\gamma,t)}$, where $l = 1,2,\ldots$ is the level of resolution, $r = 1,2,\ldots,2^{l-1}$ is the translation parameter, and t is the normalized time. Gegenbauer wavelets are defined in $[0,1]$ as follows [14]

$$\psi_{r,m}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{L_m^{\gamma}}} 2^{l/2} G_m^{\gamma}(2^l t - 2r + 1), & if \ \frac{2r-2}{2^l} \le t \le \frac{2r}{2^l} \\ 0\,, & otherwise. \end{cases}$$

The first few Gegenbauer wavelets calculated by taking $l = 1, M = 4$ and $\gamma = 30$ can be listed as

$$\psi_{1,0}^{30}(t) = \begin{cases} 2.49122, & 0 \le t \le 1 \\ 0, & otherwise, \end{cases}$$

$$\psi_{1,1}^{30}(t) = \begin{cases} 39.2318t - 19.6159, & 0 \le t \le 1 \\ 0, & otherwise, \end{cases}$$

$$\psi_{1,2}^{30}(t) = \begin{cases} 447.481t^2 - 447.481t + 110.066, & 0 \le t \le 1 \\ 0, & otherwise, \end{cases}$$

$$\psi_{1,3}^{30}(t) = \begin{cases} 4264.91t^3 - 6397.36t^2 + 3148.7t - 508.124, & 0 \le t \le 1 \\ 0, & otherwise. \end{cases}$$

2.3. Function approximation:

Any unknown function $f(t) = \in L^2(\mathbb{R})$ defined in [0,1] can be expanded by the Gegenbauer wavelet series as follows:

$$f(t) = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \omega_{rm} \psi_{r,m}(t), \tag{3.1}$$

where ω_{rm} is the Gegenbauer wavelet coefficient of the form $\omega_{rm} = < f(t), \psi_{r,m}(t) >$ and $<.,.>$ is the inner product. Truncating the infinite series in Eq. (3.1) yields

$$f(t) = \sum_{r=1}^{2^{l-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{rm} \psi_{r,m}(t) = \Omega^T \Psi(\mathrm{t}), \tag{3.2}$$

where Ω and Ψ(t) are the $2^{l-1}M \times 1$ matrices given by

$$\Omega^T = [\omega_{1,0}, \omega_{1,1}, \ldots, \omega_{1,M-1}, \omega_{2,0}, \omega_{2,1}, \ldots, \omega_{2,M-1}, \ldots, \omega_{2^{l-1},0}, \omega_{2^{l-1},1}, \ldots, \omega_{2^{l-1},M-1}]$$

$$\Psi(\mathrm{t}) = [\psi_{1,0}(t), \psi_{1,1}(t), \ldots, \psi_{1,M-1}(t), \psi_{2,0}(t), \psi_{2,1}(t), \ldots, \psi_{2,M-1}(t)$$

$$, \ldots, \psi_{2^{l-1},0}(t), \psi_{2^{l-1},1}(t), \ldots, \psi_{2^{l-1},M-1}(t)].$$

2.4. Implementation of the method:

Gegenbauer wavelet method can be adapted to any system by expanding the solution in terms of Gegenbauer polynomials, applying the system's operator to the expansion, using orthogonality to derive a system of equations, and solving for the coefficients. Due to this flexibility and precision, it is a powerful method for approximating solutions of complex differential equations across multiple fields. In order to solve the system, we first approximate the unknown functions $X_1(t), X_2(t)$ and $X_3(t)$ by using Eq. (3.2) as follows

$$X_1(t) = \sum_{r=1}^{2^{l-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{1,m}\psi_{r,m}(t) = \Omega_1^T \Psi(\mathrm{t}),$$

$$X_2(t) = \sum_{r=1}^{2^{l-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{2,m}\psi_{r,m}(t) = \Omega_2^T \Psi(\mathrm{t}), \tag{3.3}$$

$$X_3(t) = \sum_{r=1}^{2^{l-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{3,m}\psi_{r,m}(t) = \Omega_3^T \Psi(\mathrm{t}),$$

and hence,

$$X_1{}'(t) = \sum_{r=1}^{2^{l-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{1,m}\psi'_{r,m}(t) = \Omega_1^T \Psi'(\mathrm{t}),$$

$$X_2{}'(t) = \sum_{r=1}^{2^{l-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{2,m}\psi'_{r,m}(t) = \Omega_2^T \Psi'(\mathrm{t}), \tag{3.4}$$

$$X_3{}'(t) = \sum_{r=1}^{2^{l-1}} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{3,m}\psi'_{r,m}(t) = \Omega_3^T \Psi'(\mathrm{t}),$$

where $\Psi'(\mathrm{t})$ is the $2^{l-1}M \times 1$ matrices given by

$$\Psi'(\mathrm{t}) = [\psi'_{1,0}(t), \psi'_{1,1}(t), \ldots, \psi'_{1,M-1}(t), \psi'_{2,0}(t), \psi'_{2,1}(t), \ldots, \psi'_{2,M-1}(t)$$

$$, \ldots, \psi'_{2^{l-1},0}(t), \psi'_{2^{l-1},1}(t), \ldots, \psi'_{2^{l-1},M-1}(t)].$$

Afterwards, we substitute the approximations in Eq. (3.3) and (3.4) into Eq. (2.1) and we obtain

$$\Omega_1^T \Psi'(\mathrm{t}) - \frac{F_{13}}{V_3}\Omega_3^T \Psi(\mathrm{t}) + \frac{F_{31}}{V_1}\Omega_1^T \Psi(\mathrm{t}) + \frac{F_{21}}{V_1}\Omega_1^T \Psi(\mathrm{t}) - p(t) = 0$$

$$\Omega_2^T \Psi'(t) - \frac{F_{21}}{V_1}\Omega_1^T \Psi(\mathrm{t}) + \frac{F_{32}}{V_2}\Omega_2^T \Psi(\mathrm{t}) = 0 \qquad 0 \le t \le b \tag{3.5}$$

$$\Omega_3^T \Psi'(t) - \frac{F_{31}}{V_1}\Omega_1^T \Psi(\mathrm{t}) - \frac{F_{32}}{V_2}\Omega_2^T \Psi(\mathrm{t}) + \frac{F_{13}}{V_3}\Omega_3^T \Psi(\mathrm{t}) = 0$$

with the initial conditions

$$\Omega_1^T\Psi(0) = r_1, \quad \Omega_2^T\Psi(0) = r_2, \quad \Omega_3^T\Psi(0) = r_3. \tag{3.6}$$

To solve the system described by Eq. (3.5) with the initial conditions given in Eq. (3.6), we need to solve $3(2^{l-1}M \times 1)$ equations. This gives us the same number of unknown coefficients. The first three equations are based on the initial conditions Eq. (3.6). The remaining equations are obtained by substituting the standard collocation points, $t_j = \frac{(2j-1)h}{2^l M}$, where $j = 1,2,\ldots, M-1$, into Eq. (2.1).

$$\Omega_1^T\Psi'(t_j) - \frac{F_{13}}{V_3}\Omega_3^T\Psi(t_j) + \frac{F_{31}}{V_1}\Omega_1^T\Psi(t_j) + \frac{F_{21}}{V_1}\Omega_1^T\Psi(t_j) - p(t_j) = 0$$

$$\Omega_2^T\Psi'(t_j) - \frac{F_{21}}{V_1}\Omega_1^T\Psi(t_j) + \frac{F_{32}}{V_2}\Omega_2^T\Psi(t_j) = 0 \qquad 0 \le t \le b$$

$$\Omega_3^T\Psi'(t_j) - \frac{F_{31}}{V_1}\Omega_1^T\Psi(t_j) - \frac{F_{32}}{V_2}\Omega_2^T\Psi(t_j) + \frac{F_{13}}{V_3}\Omega_3^T\Psi(t_j) = 0. \tag{3.7}$$

Once we solve the system given in Eq. (3.7), we can determine the unknown coefficients. Then, by substituting these coefficients back into Eq. (3.5), we can obtain the desired solutions.

3. Numerical results and discussions

In this section, the numerical method explained in Section 3 is implemented by using specific parameter values associated with problem (2.1), and results are presented in terms of tables and graphs. All computations are conducted by using Mathematica 12.0 on a computer with a Windows 10 64-bit operating system. The problem parameters are taken as: $p(t) = 1 + \sin(t)$, $F_{13} = 38mi^3/year$, $F_{21} = 18mi^3/year$, $F_{31} = 20mi^3/year$, $F_{32} = 18mi^3/year$, $V_1 = 2900mi^3$, $V_2 = 850mi^3$, $V_3 = 1180mi^3$. Since there is no pollution at the beginning, initial conditions for each lake are zero, [1].

In the literature, this problem is solved by using $3^{rd}, 6^{th}$ and 10^{th} degree polynomials. Hence, we also solve the problem using the same degree polynomials for comparison purposes. l is taken as 1 and γ is taken as 30 throughout the study. The 3^{rd} degree approximation polynomials

$$X_{1,3}(t) = 2.77556 \times 10^{-17} + 0.995361t + 0.522067t^2 - 0.0626506t^3,$$

$$X_{2,3}(t) = -2.1684 \times 10^{-19} - 0.0000119539t + 0.0031625t^2 + 0.000904805t^3,$$

$$X_{3,3}(t) = -2.1684 \times 10^{-19} - 0.0000130571t + 0.00351245t^2 + 0.00101764t^3,$$

the 6^{th} degree approximation polynomials

$$X_{1,6}(t) = 1.21431 \times 10^{-17} + 0.1t + 0.493439t^2 - 0.0020665t^3 - 0.0417986t^4 + 0.00325774t^5 + 0.00124991t^6,$$

$$X_{2,6}(t) = -1.87194 \times 10^{-19} - 1.05987 \times 10^{-8}t + 0.00310359t^2 + 0.0009981925t^3 - .\, 6.05712 \times 10^{-6}t^4 - 0.0000558183t^5 + 3.82419 \times 10^{-6}t^6,$$

$$X_{3,6}(t) = -6.43745 \times 10^{-20} - 1.18264 \times 10^{-8}t + 0.00344843t^2 + 0.00111833t^3 - 4.56587 \times 10^{-6}t^4 - 0.0000620638t^5 + 4.18187 \times 10^{-6}t^6,$$

and the 10^{th} degree approximation polynomials are obtained as follows

$$X_{1,10}(t) = -3.70255 \times 10^{-17} + 1.0t + 0.493448t^2 - 0.00211828t^3 - 0.0416507t^4 + 0.000109127t^5 + 0.00138829t^6 - 2.49434 \times 10^{-6}t^7 - 0.0000249136t^8 + 1.22844 \times 10^{-7}t^9 + 2.45148 \times 10^{-7}t^{10},$$

$$X_{2,10}(t) = -2.26634 \times 10^{-19} - 3.70657 \times 10^{-14}t + 0.00310345t^2 + 0.000999021t^3 - 8.57585 \times 10^{-6}t^4 - 0.0000516683t^5 + 2.9605 \times 10^{-7}t^6 + 1.22859 \times 10^{-6}t^7 - 3.30126 \times 10^{-9}t^8 - 1.86713 \times 10^{-8}t^9 + 7.99694 \times 10^{-10}t^{10},$$

$$X_{3,10}(t) = -2.14802 \times 10^{-20} - 4.13529 \times 10^{-14}t + 0.00344828t^2 + 0.00111926t^3 - 7.37414 \times 10^{-6}t^4 - 0.0000574384t^5 + 2.52255 \times 10^{-7}t^6 + 1.36582 \times 10^{-6}t^7 - 2.29114 \times 10^{-9}t^8 - 2.07615 \times 10^{-8}t^9 + 8.75351 \times 10^{-10}t^{10},$$

We compare the CPU time of the current method and the BRCM [3] both employing a 10^{th} degree polynomial, along with the RK4 with step size $\Delta t = 0.1$ and Mathematica default solver and present the results in Table 1. We can see from this table that, even with a high-degree polynomial, the CPU time of the proposed method is quite small compared to RK4 and Mathematica, but significantly smaller than the BRCM. This demonstrates the high efficiency of the current method.

Table 1. Comparison of the CPU time

	BRCM [3]	GWM	RK4	Mathematica
CPU	4.29	0.080411	0.011045	0.104975

Table 2 represents the results of the GWM, the Bernoulli Ritz-collocation method (BRCM) [3], the Bessel collocation method (BCM) [3] all using 10^{th} degree polynomials as well as the fourth order Runge Kutta method (RK4) with stepsize $\Delta t = 0.1$ and

Mathematica default solver. One can see from the table that the solution of the current method agrees well with the other numerical methods.

Table 2. Comparison of the BCM [5], the BRCM [3], the GWM all using 10^{th} order polynomials, together with the RK4 and Mathematica default solver for each lake

		t = 0.2	t = 0.4	t = 0.6	t = 0.8	t = 1
$X_1(t)$	RK4	0.21965447	0.47775668	0.77185868	1.09805724	1.45114967
	BCM [5]	0.21965447	0.47775668	0.77185867	1.09805723	1.45114965
	BRCM [3]	0.21965450	0.47775670	0.77185870	1.09805700	1.45115000
	GWM	0.21965447	0.47775668	0.77185867	1.09805723	1.45114965
	Mathematica	0.21965442	0.47775665	0.77185865	1.09805724	1.45114961
$X_2(t)$	RK4	1.321000×10^{-4}	5.597440×10^{-4}	1.327949×10^{-3}	2.477595×10^{-3}	4.043729×10^{-3}
	BCM [5]	1.320999×10^{-4}	5.597436×10^{-4}	$1.327949\times$	2.477594×10^{-3}	4.043728×10^{-3}
	BRCM [3]	1.320999×10^{-4}	5.597436×10^{-4}	1.327949×10^{-3}	2.477594×10^{-3}	4.043728×10^{-3}
	GWM	1.320999×10^{-4}	5.597436×10^{-4}	1.327949×10^{-3}	2.477595×10^{-3}	4.043729×10^{-3}
	Mathematica	1.321079×10^{-4}	5.597516×10^{-4}	1.327957×10^{-3}	2.477603×10^{-3}	4.043736×10^{-3}
$X_3(t)$	RK4	1.468551×10^{-4}	6.225831×10^{-4}	1.477767×10^{-3}	2.758464×10^{-3}	4.504315×10^{-3}
	BCM [5]	1.468549×10^{-4}	6.225828×10^{-4}	1.477766×10^{-3}	2.758463×10^{-3}	4.504314×10^{-3}
	BRCM [3]	1.468549×10^{-4}	6.225828×10^{-4}	1.477766×10^{-3}	2.758463×10^{-3}	4.504314×10^{-3}
	GWM	1.468549×10^{-4}	6.225828×10^{-4}	1.477766×10^{-3}	2.758463×10^{-3}	4.504314×10^{-3}
	Mathematica	1.468639×10^{-4}	6.225917×10^{-4}	1.477775×10^{-3}	2.758472×10^{-3}	4.504323×10^{-3}

In order to validate the proposed method, we calculate the residual error of the approximate solution for each lake. $RE_{X_1(t)}$, $RE_{X_2(t)}$ and $RE_{X_3(t)}$ represent the residual error calculated by substituting the approximate solutions into Eq. (2.1)

$$RE_{X_1(t_i)} = \left|\frac{F_{13}}{V_3}X_3(t_i) - \frac{F_{31}}{V_1}X_1(t_i) - \frac{F_{21}}{V_1}X_1(t_i) + p(t_i) - \frac{dX_1(t_i)}{dt}\right|,$$

$$RE_{X_2((t_i))} = \left|\frac{F_{21}}{V_1}X_1((t_i)) - \frac{F_{32}}{V_2}X_2((t_i)) - \frac{dX_2(t_i)}{dt}\right|,$$

$$RE_{X_3((t_i))} = \left|\frac{F_{31}}{V_1}X_1((t_i)) + \frac{F_{32}}{V_2}X_2((t_i)) - \frac{F_{13}}{V_3}X_3((t_i)) - \frac{d\,X_{3(t_i)}}{dt}\right|.$$

Table 3 presents the comparison of the residual error of the current technique, the Boubaker polynomial method (BPM) [7] and BCM [5] using 3^{rd} degree polynomials. One can see that the results are quite close to each other. But at some points the residual error of the current method is smaller.

Table 3. Comparison of the residual errors for the BPM [7], the BCM [5] and the GWM using 3^{rd} order polynomials for each lake

		t = 0	t = 0.2	t = 0.4	t = 0.6	t = 0.8	t = 1
$RE_{X_{1,3}}(t)$	BPM [7]	0	1.96030×10^{-3}	1.10160×10^{-3}	1.61790×10^{-3}	7.36010×10^{-3}	3.18840×10^{-2}
	BCM [5]	0	1.96030×10^{-3}	1.10160×10^{-3}	1.61790×10^{-3}	7.36010×10^{-3}	3.18840×10^{-2}
	GWM	0	5.67899×10^{-4}	6.60513×10^{-4}	8.89004×10^{-4}	2.07430×10^{-3}	1.60792×10^{-2}
$RE_{X_{2,3}}(t)$	BPM [7]	0	4.56380×10^{-6}	2.60790×10^{-6}	3.91180×10^{-6}	1.82550×10^{-5}	8.14960×10^{-5}
	BCM [5]	0	4.56380×10^{-6}	2.60790×10^{-6}	3.91180×10^{-6}	1.82550×10^{-5}	8.14960×10^{-5}
	GWM	0	1.47272×10^{-6}	1.74049×10^{-6}	2.39078×10^{-6}	5.71874×10^{-6}	4.56543×10^{-5}
$RE_{X_{3,3}}(t)$	BPM [7]	0	4.97420×10^{-6}	2.84240×10^{-6}	4.26360×10^{-6}	1.98970×10^{-5}	8.88260×10^{-5}
	BCM [5]	0	4.97420×10^{-6}	2.84240×10^{-6}	4.26360×10^{-6}	1.98970×10^{-5}	8.88260×10^{-5}
	GWM	0	1.60864×10^{-6}	1.90112×10^{-6}	2.61143×10^{-6}	6.24654×10^{-6}	4.98679×10^{-5}

Once the degree of the approximation polynomial increases, the residual error of the current method decreases. Table 4 shows that the residual error of the current method is smaller than the other methods after $t = 0.4$ when the degree of the polynomial is 6. A similar behavior is observed in Table 5. At $t = 0$, the residual error of the methods are close to each other, but after this time the residual error of the current method is smaller than the other methods. Hence, we may say that the proposed method is more accurate than the BPM and the BCM.

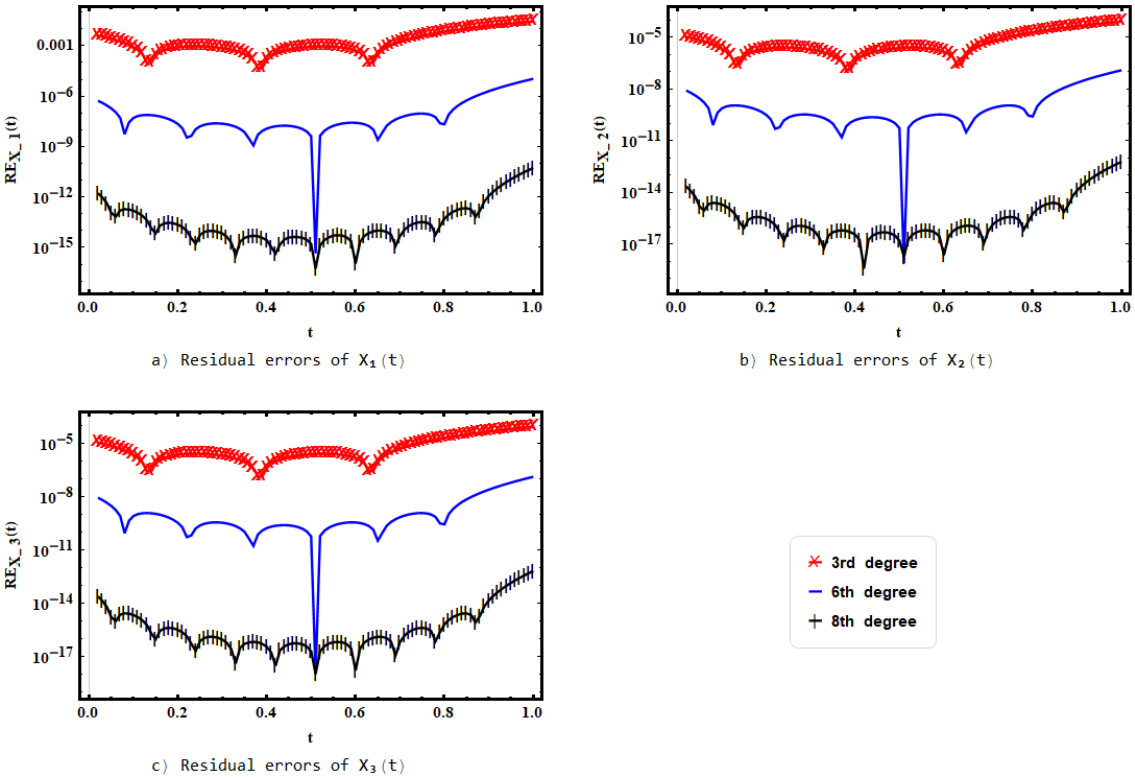
Table 4. Comparison of the residual errors for the BPM [7], the BCM [5] and the GWM using 6^{th} order polynomials for each lake

		t = 0	t = 0.2	t = 0.4	t = 0.6	t = 0.8	t = 1
$RE_{X_{1,6}}(t)$	BPM [7]	0	4.22730×10^{-8}	4.11970×10^{-8}	6.56580×10^{-8}	2.02930×10^{-7}	1.04560×10^{-5}
	BCM [5]	0	4.22730×10^{-8}	4.11970×10^{-8}	6.56580×10^{-8}	2.02930×10^{-7}	1.04560×10^{-5}
	GWM	0	6.64391×10^{-8}	2.11896×10^{-8}	4.44089×10^{-16}	6.55893×10^{-8}	2.44337×10^{-6}
$RE_{X_{2,6}}(t)$	BPM [7]	0	6.07690×10^{-10}	5.54390×10^{-10}	8.31580×10^{-10}	2.43080×10^{-9}	1.18990×10^{-7}
	BCM [5]	0	6.07690×10^{-10}	5.54390×10^{-10}	8.31580×10^{-10}	2.43080×10^{-9}	1.18990×10^{-7}
	GWM	0	9.59807×10^{-10}	2.86258×10^{-10}	7.80964×10^{-19}	7.87210×10^{-10}	2.78344×10^{-8}
$RE_{X_{3,6}}(t)$	BPM [7]	0	6.78000×10^{-10}	6.18530×10^{-10}	9.27790×10^{-10}	2.71200×10^{-9}	1.32750×10^{-7}
	BCM [5]	0	6.78000×10^{-10}	6.18530×10^{-10}	9.27790×10^{-10}	2.71200×10^{-9}	1.32750×10^{-7}
	GWM	0	1.07099×10^{-9}	3.19418×10^{-10}	1.09606×10^{-18}	8.78399×10^{-10}	3.10587×10^{-8}

Table 5. Comparison of the residual errors for the BPM [7], the BCM [5] and the GWM using 10^{th} order polynomials for each lake

		t = 0	t = 0.2	t = 0.4	t = 0.6	t = 0.8	t = 1
$RE_{X_{1,10}}(t)$	BPM [7]	0	1.26760×10^{-13}	1.21070×10^{-13}	9.85880×10^{-14}	5.07370×10^{-14}	4.89280×10^{-11}
	BCM [5]	0	1.24480×10^{-13}	2.53460×10^{-13}	3.91240×10^{-13}	5.41460×10^{-13}	4.96510×10^{-11}
	GWM	0	1.15200×10^{-13}	4.38538×10^{-15}	5.55112×10^{-17}	1.13243×10^{-14}	2.08822×10^{-12}
$RE_{X_{2,10}}(t)$	BPM [7]	0	6.61150×10^{-16}	8.09190×10^{-16}	9.37060×10^{-16}	1.01970×10^{-15}	5.45960×10^{-13}
	BCM [5]	0	1.76210×10^{-15}	3.45760×10^{-15}	5.08630×10^{-15}	6.64640×10^{-15}	5.38930×10^{-13}
	GWM	0	1.49896×10^{-15}	5.23647×10^{-17}	1.90972×10^{-18}	1.37462×10^{-16}	2.35596×10^{-14}
$RE_{X_{3,10}}(t)$	BPM [7]	0	7.45460×10^{-16}	9.14160×10^{-16}	1.06390×10^{-15}	1.16670×10^{-15}	6.09290×10^{-13}
	BCM [5]	0	1.52350×10^{-15}	2.95500×10^{-15}	4.28400×10^{-15}	5.51610×10^{-15}	6.17950×10^{-13}
	GWM	0	1.67600×10^{-15}	6.12146×10^{-17}	1.07865×10^{-18}	1.54378×10^{-16}	2.63161×10^{-14}

Fig. (2) represents the residual error for the lake pollution model of a three-lake interconnected system, solved by using the Gegenbauer Wavelet Method (GWM) with polynomial degrees of 3, 6, and 10. Each curve in the graph corresponds to the residual error for a different polynomial, allowing a clear comparison of the solution accuracy across varying levels of approximation. The figure demonstrates that as the degree of the polynomial increases, the residual error decreases significantly, highlighting the ability to provide precise and refined solutions for the interconnected lake pollution model.



a) Residual errors of $X_1(t)$ b) Residual errors of $X_2(t)$

c) Residual errors of $X_3(t)$

Figure 2. Residual error of $RE_{X_1(t)}, RE_{X_2(t)}$ and $RE_{X_3(t)}$ for $M = 4, M = 7$ and $M = 11$ on $0 \leq t \leq 1$ for Lake 1, Lake 2, Lake 3, respectively.

Fig. (3) illustrates the level of pollution in three lakes (Lake 1, Lake 2, and Lake 3) over a longer period of time. We compare the solution curves for the lake pollution model obtained by using 10^{th} degree polynomial and the RK4 method with step size $\Delta t = 0.1$. These graphs show the pollution dynamics over an extended time. Both methods exhibit excellent agreement throughout the time period, demonstrating that the GWM and the RK4 maintain high accuracy even over the extended time frame. This highlights the robustness and reliability of the current approach in modeling the interconnected lake pollution system.

One can see from Fig. (3) that the increase of the contamination in the first lake is significant with a sinusoidal behaviour, while the second and third lakes are contaminated as well with an exponential behaviour but the level of pollution at these lakes are much smaller than the first lake, and nearly equal to each other.

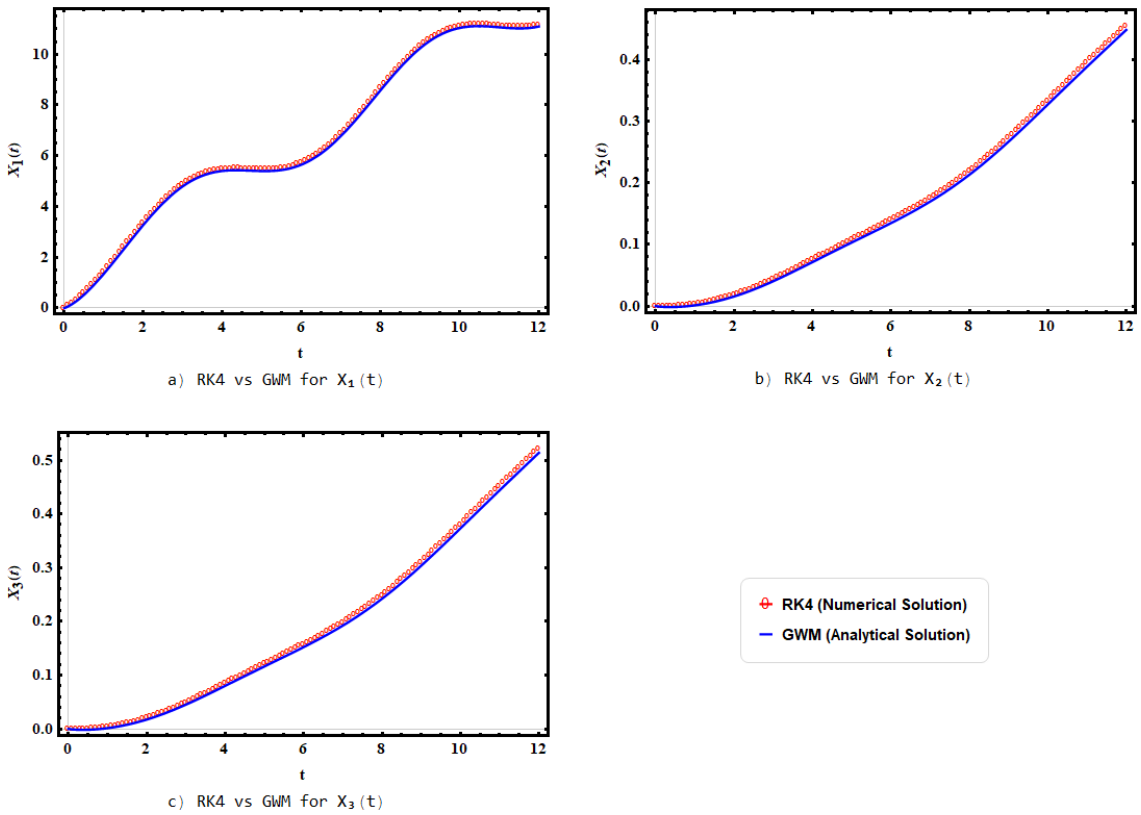


Figure 3. $X_1(t), X_2(t)$ and $X_3(t)$ of the GWM solutions with 10^{th} degree polynomials with $l = 1$ and RK4 $\Delta t = 0.1$ for $0 \leq t \leq 12$ for each of the lakes.

4. Conclusion

In this study, we investigated the pollution dynamics within a system of three interconnected lakes, employing the Gegenbauer wavelet method to effectively solve this system. Our approach is notable for its dual application across both short-term ($t = 0$ to $t = 1$) and extended time intervals ($t = 0$ to $t = 12$), offering a novel perspective on long- term pollutant behavior modeling. Comparative analysis with Mathematica default solver, the 4^{th} order Runge-Kutta method, and other techniques demonstrates the superior accuracy of the Gegenbauer wavelet method, with minimized residual errors confirming its robustness. The residual error graphs further validate the method's effectiveness, high- lighting its potential for precise long-term pollution forecasting in environmental models. Additionally, the Gegenbauer wavelet method exhibits considerable computational efficiency, even when utilizing high-degree polynomials. Despite the inherent complexity of high-degree expansions, our approach maintains practical CPU time, underscoring its suitability for large-scale or real-time applications. This computational efficiency, combined with the stability and adaptability, makes it a highly practical choice in the solution of complex systems with high precision while minimizing computational demands. This work underscores the versatility and effectiveness of the Gegenbauer wavelet method in addressing complex environmental systems, paving the way for future research on adaptive wavelet techniques in similar applications.

References

[1] Biazar, J., Farrokhi, L., Islam, M.R. Modeling the pollution of a system of lakes, **Applied Mathematics and Computation**, 178 (2006), 423–430. Doi:10.1016/j.amc.2005.11.05

[2] Prakasha, D.G., Veeresha, P. Analysis of Lakes pollution model with Mittag-Leffler kernel, **Journal of Ocean Engineering and Science**, 5 (2020), 310–322. Doi: 10.1016/j.joes.2020.01.004.

[3] Sokhanvar, E., Yousefi, S.A. The Bernoulli Ritz-collocation method to the solution of modelling the pollution of a system of lakes, **Caspian Journal of Mathematical Sciences**, 3(2) (2014), 253–265.

[4] Merdan, M. Homotopy perturbation method for solving modelling pollution of a system of lakes, **SDU Journal of Science**, 4(1) (2009), 99–111.

[5] Yüzbaşı, Ş., Şahin, N., Sezer, M. A collocation approach to solving the model of pollution for a system of lakes, **Mathematical and Computer Modelling**, 55 (2012), 330–341.

[6] Sabermahani, S., Ordokhani, Y. An analytical method for solving the model of pollution for a system of lakes of lakes, First international conference on combinatorics, cryptography and computation, 35-40 (2016). Doi: 10.5281/zenodo.2652404.

[7] Yıldırım, G., Yüzbaşı, Ş., Boubaker Collocation Method for Approximate Solutions of the Model of Pollution for a System of Lakes, **Turkish Journal of Mathematics and Computer Science**, 16(1) (2024), 240–254. Doi: 10.47000/tjmcs.1167568.

[8] Benhammouda, B., Vazquez-Leal, H., Hernandez-Martinez, L. Modified Differential Transform Method for Solving the Model of Pollution for a System of Lakes, **Discrete Dynamics in Nature and Society**, 2014 (2014), Article ID 645726, 12 pages. Doi:10.1155/2014/645726.

[9] Ghosh, I., Chowdhury, M.S.H., Mt Aznam, S., Rashid, M.M. Measuring the Pollutants in a System of Three Interconnecting Lakes by the Semianalytical Method, **Journal of Applied Mathematics**, 2021 (2021), Article ID 6664307, 16 pages. Doi:10.1155/2021/6664307.

[10] Dogan, N. Series Solution of Modelling the Pollution, **Turkish Journal of Mathematics and Computer Science**, 13(1) (2021), 81–88. Doi:10.47000/tjmcs.879627Merdan, M. Homotopy perturbation method for solving modelling pollution of a system of lakes, **SDU Journal of Science**, 4(1) (2009), 99–111.

[11] Yönet, N., Gürbüz, B. and Gökçe, A. An alternative numerical approach for an improved ecological model of interconnected lakes with a fixed pollutant, **Computational and Applied Mathematics** , 42:56 (2023). Doi:10.1007/s40314-023-02191-3.

[12] Biazar, J., Shahbala, M. and Ebrahimi, H. VIM for Solving the Pollution Problem of a System of Lakes, **Journal of Control Science and Engineering**, 2010 (2010), Article ID 829152, 6 pages. Doi:10.1155/2010/

[13] Beler, A., Özaltun Simşek, G., Gümgüm, S. Numerical Solutions of the HIV Infection Model of $CD4^{(+)}$ Cells by Laguerre Wavelets, **Mathematics and Computers in Simulation**, 209 (2023), 205–219. Doi:10.1016/j.matcom.2023.02.016.

[14] Çelik, İbrahim Generalization of Gegenbauer Wavelet Collocation Method to the Generalized Kuramoto–Sivashinsky Equation, **International Journal of Applied and Computational Mathematics** , 4 (2018. Doi:10.1007/s40819-018-0546-2.

[15] Ersoy Özdek, D. Laguerre Wavelet Solution of Bratu And Duffing Equations, **TWMS Journal Of Applied And Engineering Mathematics**, 11(1) (2021), 66–77.

[16] Gümgüm, S., Özdek, D.E., Özaltun, G., Bildik, N. Legendre wavelet solution of neutral differential equations with proportional delays, **Journal of Applied Mathematics and Computing**, 1(1-2) (2019), 389–404. Doi:10.1007/s12190-019-01256-z.

[17] Gümgüm, S., Ersoy Özdek, D., Özaltun, G. Legendre wavelet solution of high order nonlinear ordinary delay differential equations, **Turkish Journal of Mathematics**, 43(3) (2019), 1339–1352. Doi:10.3906/mat-1901-109.

[18] Özaltun Simsek, G., Gümgüm, S. Numerical solutions of Troesch and Duffing equations by Taylor wavelets, **Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics**, 52(2) (2023), 292–302. Doi:10.15672/hujms.1063791

[19] Özaltun Şimşek, G., Beler, A., Gümgüm, S. Gegenbauer Wavelet Solutions of the SIR and the SITR Systems of the COVID-19 Disease, **International Journal of Biomathematics,** (2024). Doi: 10.1142/S1793524524501432

[20] Özaltun, G., Konuralp, A., Gümgüm, S. Gegenbauer wavelet solutions of fractional integro-differential equations, **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 420(09) (2023). Doi:10.1016/j.cam.2022.114830.

DOI:10.25092/baunfbed. 1639200 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 750-761, (2025)*

Sürdürülebilir ürün gelişim modellemesi: Gıda sanayinde gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) fileto atıklarından sos eldesi

Tuba FİDANCİ AKBEY[1*], Ayşe KARA[2], Gonca ALAK[3]

[1]Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 25240 Erzurum-Türkiye
[2]Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Su ürünleri Fakültesi, Avlama ve İşleme Teknolojileri Bölümü, 53100 Rize-Türkiye
[3]Atatürk Üniversitesi, Su ürünleri Fakültesi, Avlama ve İşleme Teknolojileri Bölümü, 25240 Erzurum-Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 13.02.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 02.06.2025

Öz

Atık yönetimi ve kaynak geri kazanımı gibi entegre faydalarından dolayı endüstriyel balık atıklarının değerlendirilmesi işleme teknolojisi alanında ilgi görmektedir. Biyolojik olarak kolay parçalanabilen organik maddelere sahip olan bu atıklar farklı endüstriyel kullanımlar için uygun ve umut verici bir hammadde olmaya başlamıştır. Bu çalışmada, su ürünleri işleme atıklarından (proses sonucu oluşan balık fileto kırpıntı ve kas dokuları) baharatlar ve çeşitli sebzeler eşliğinde alternatif bir ezme oluşturarak tüketicinin beğenisine sunmanın yanı sıra sürdürülebilirlik ve yeşil ürün hedefleri kapsamında fileto atıklarının katma değerli ürünler olarak geri kazandırılması amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda ilk aşamada, elde edilen fileto kırpıntıları farklı soslarla zenginleştirilerek homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Cam kavanozlara alınan soslar konserve edilerek 120 gün süresince mikrobiyolojik, kimyasal ve duyusal analizlerle takip edilmiştir. Elde edilen bulgularda kimyasal parametrelerle fermantasyon süresi arasında pozitif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Duyusal değerlendirme sonuçları dikkate alındığında bu tarz ürünlerin kabul edilir bir albenisinin olduğu, yöresel dokunuşlarla geniş bir yelpazede tüketim potansiyeli taşıdığı sonucu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Yan ürün, sos, alabalık, işleme atık*

[*]Tuba FİDANCİ AKBEY, t.fidanci@hotmail.com, http://orcid.org/0000-0001-5632-4109
Ayşe KARA, ayse.kara1@erdogan.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-8448-2144
Gonca ALAK, galak@atauni.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-7539-1152

Sustainable product development modelling: Obtaining sauce from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)fillet waste in the food ındustry

Abstract

Due to their integrated benefits in waste management and resource recovery, the utilization of industrial fish waste in processing technology is gaining interest. These wastes, which are biologically easily degradable, have become promising raw materials for various industrial uses. This study aims to present an alternative paste made from seafood processing waste (fillet scraps and muscle tissues) combined with spices and vegetables. By transforming fillet waste into value-added products, this paste will contribute to sustainability and green product goals. Initially, the fillet scraps were homogenously mixed with sauce. The sauces, stored in glass jars, were canned and monitored for 120 days through microbiological, chemical, and sensory analyses. The results showed a positive correlation between chemical parameters and fermentation time. Sensory evaluation results indicated that such products have an acceptable appeal and the potential for widespread consumption with regional touches.

Keywords: Byproduct, sauces, trout, process waste

1. Giriş

Gıda endüstrisi et, balık, şeker, süt, meyve ve sebzelerin işlenmesinden yan ürünler üretir. Yan ürün, ana ürünün üretimi sırasında ortaya çıkan diğer herhangi bir üründür. Bu hedef dışı ürünler bir piyasa değerine sahip olabilir veya olmayabilir. Bunlar fiziksel durumlarına bağlı olarak katı, sıvı ve karışık yan ürünler olarak gruplandırılmaktadır. Balıkların işlenmesinden elde edilen yan ürünler proteinler, yağlar, mineraller ve vitaminler açısından oldukça zengin olup balık canlı ağırlığının %70' ini oluşturur ve kullanılmayan büyük miktarda ham maddeyi (kafa, yüzgeç, fileto kırpıntıları, iskelet, deri, pullar, iç organlar) temsil eder [1].

Son yıllarda tüketiciler az düzeyde işlem görmüş, doğal ürünleri tercih etmektedir. Yöresel ve bölgesel olarak değişiklik gösterebilen ve genellikle fermantasyon sonucu oluşan ürünlerden olan [2] balık sosları artan talepler doğrultusunda kaliteli gıda tüketimi, gıdaların korunması için yeni teknolojilerin araştırılması, fonksiyonel gıdalar için atıklar ve sürdürülebilir kaynaklardan yeni teknolojileri üretebilme fikri ile ortaya çıkmıştır [3-6].

Fermantasyon yolu ile yapılan bu balık sosları, iç organların çok yüksek tuz konsantrasyonunda hidrolize edilerek üretilmektedir [7]. Tablo 1'de gösterildiği gibi deniz balıklarının yanı sıra tatlı su balıkları, karides ve midye gibi kabukluların atıkları ile de bu soslar hazırlanmaktadır [8]. Tablo 1 incelendiğinde, çalışmamızda tatlı su balığı kullanılması ve fileto kırpıntılarının değerlendirilmesi geleneksel (klasik fermentasyon, ev tipi) yaklaşımın kullanılması açısından farklıdır.

Tablo 1. Farklı balık atıklarından elde edilen soslara ait bazı çalışmalar

Balık Türü	Çalışma Konusu	Referanslar
Gadus morhua, *Gadus macrocephalus*	Tuzlu balık endüstrisinden çıkan atıkların fermante balık sosu üretiminde kullanımı	[9]
Sprattus sprattus	Azaltılmış tuz ve laktik asit bakterileri eklemenin balık sosunun kalitesine etkisi	[10]
Tunnus thynnus *Scomber scombrus*	"Garum" adlı Roma balık sosunun hazırlanmasında hücre dışı enzimlerin kullanımı	[11]
Merluccius productus	Pasifik alabalığı ve surimi yan ürünlerinden yapılan balık sosu	[12]
Merluccius productus	Pasifik alabalığından yapılan balık sosunun tüketici kabulü	[13]
Kastsuwonus pelamis	Balık iç organlarının balık sosunda meydana gelen kimyasal, fiziksel ve mikrobiyolojik değişimler	[14]

Su ürünleri endüstrisi, hem gıda temini hem de gelir kaynağı olmasının yanı sıra sahip oldukları karbonhidrat, protein, yağ, mineral maddeler ve vitaminler sayesinde dengeli beslenmede günden güne gıda sanayisinde de daha öncelik kazanan bir sektör halini almıştır. Yüksek değerli proteinlerin içeriği, uzun zincirli ω-3 yağ asitleri ve mikro elementlerin kaynağı sayesinde, beslenmemizde temel besin kaynağıdır. Son yıllarda balık üreticileri, su kaynaklarının azalması, artan alan kullanım verimliliği ve gelir gibi çeşitli nedenlerle yoğun ve süper yoğun gökkuşağı alabalığı yetiştirme sistemlerine yönelmişlerdir [15].

Yüksek besin değeri ile gökkuşağı alabalığı, önemli bir soğuk su balığı olup dünya çapında ve ülkemizde yaygın olarak yetiştiriciliği yapılan bir türdür. Su ürünleri istatistik verilerine göre; Türkiye, 814 bin tonluk gökkuşağı alabalığı üretimi ile dünya toplamının %14,06'sını karşılayarak dünyanın en büyük üreticisi konumundadır [16 -17]. Son on yılda, küresel balık üretimi ve tüketiminin büyük ölçüde artması, balık endüstrisinin herhangi bir geri kazanım girişimi olmadan sıklıkla atılan veya düşük katma değerli ürünlerde yetersiz kullanılan yan ürünlerin miktarlarının artmasına neden olmuştur [18]. Bu çalışma da yukarıda belirtilen süreç ve tüketici eğilimleri dikkate alınarak su ürünleri orjinli atıkların katma değerli ürünler olarak gıda sanayine kazandırılması ve gıdanın kalitesine olan etkisi gibi konularda literatüre katkı sağlayacak bir model çalışma olması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve metot

2.1. Gökkuşağı alabalığı (O. mykiss) işleme atıklarının temini ve kas doku tasnifi

Atatürk Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi bünyesinde bulunan İçsu Balıkları Uygulama ve Araştırma Merkezi işleme ünitesinden temin edilen işleme prosesi olarak bilinen fileto çıkarma atıklarından kılçık üzerinde kalan kas dokular ayrılarak musluk suyuyla birkaç kez yıkanmıştır. Elde edilen fileto kırpıntı kas dokuları süzülerek aşağıda belirtilen prosedürle (Tablo 2) marine edilmiştir.

Tablo 2**.** Sos yapımında kullanılan malzemeler ve miktarları

Malzeme	Miktar
Fileto kırpıntısı (kılçık)	150 g
Köy biberi	400 g (6 adet)
Şili biberi	200 g (7 adet)
Kapya biber	800 g (6 adet)
Domates (Kabukları soyulmuş)	10 adet
Maydanoz	1 bağ
Sarımsak	1 adet (baş)
Kaya tuzu	7 yemek kaşığı
Limon tuzu	4 yemek kaşığı
Sıvı yağ	180 mL (2 çay bardağı)
Üzüm sirkesi	270 mL (3 çay bardağı)

Cam bir kap içerisine ufak parçalar haline getirilen sebzeler ve fileto atıkları homojen bir şekilde karıştırıldı. İçerisine reyhan (*Ocimum basilicum* L.), sıvı yağ, sirke, kaya tuzu, limon tuzu katılarak tatlandırılma işlemi yapıldı. Karışım 330 ml cam kavanozlara eşit bir şekilde paylaştırıldı. Kapaklar aşağıda kalacak şekilde ters bir durumda soğuk su dolu bir tekneye yerleştirilerek kaynatma işlemi gerçekleştirildi. Vakumlama işlemi, kapaklara ısı yoluyla basınç uygulanmasıyla gerçekleştirildi, ardından numuneler soğumaya bırakılarak süreç tamamlandı. Hazırlanan soslar (Şekil 1) 2 aylık depolama süresinde kimyasal, duyusal ve mikrobiyolojik olarak izlenmiştir.

Şekil 1**.** Balık sosu

3. Kimyasal analizler

Bozulma esnasında balık kasında meydana gelen kimyasal değişimlerin takibinde kısa sürede sonuç veren ve yaygın olarak kullanılan aşağıdaki parametreler dikkate alınmıştır.

3.1.Ham kül ve kuru madde

Ham kül ve kuru madde miktarının belirlenmesine yönelik analizler Gökalp [19]'e göre yapılmıştır.

3.2.Soslara ait renk yoğunluklarının ölçümü

Sosa ait L*, a* ve b* renk ölçümü Minolta (CR-200, Minolta Co, Osaka, Japon) marka kolorimetre cihazı ile yapılmıştır. Analiz neticesinde koyuluk/açıklık değerini, L*, kırmızı/yeşil değerini, a*, ve sarı/mavi değerini ise b* temsil etmektedir [20-21].

3.3.Asitlik miktarı tayini

Sos örneğinden 2 gram alınarak, distile su ile 100 ml'ye tamamlandıktan sonra kaynayıncaya dek ısıya maruz bırakılmıştır. Oda sıcaklığına gelinceye dek birkaç damla fenolfitaleyn eklenip 0,1 N NaOH ile titre edilerek formülle hesaplanmıştır [22].

3.4.Tuz miktarı tayini

Sos örneğinden 5 g alınarak erlen aktarılmış saf su ile 250 mL' e tamamlanmıştır. Elde edilen karışımdan 10 mL alınıp 5 damla fenolfitaleyn eklenmiştir. Akabinde nötralize işlemi için 0,1 N NaOH (pembemsi renk gözleninceye kadar) ilave edilmiştir. Nötralize işleminin ardından 5 damla K_2CrO_4 (%5'lik) eklenerek 0,1 N $AgNO_3$ ile titre edilmiştir. Titrasyon sonucu kırmızı-kahverengi renk oluşumu gözlendikten sonra tuz miktarı hesaplanmıştır [22].

3.5. Toplam uçucu bazik azot (TVB-N) miktarı analizi

TVB-N analizinde homojen haline getirilen 40 gr sos 80 mL TCA çözeltisi ile IKA WerkTp marka Ultra Turrax'da 5 dk boyunca homojenize edilmiştir [23]. Ardından filtre kağıdından geçirildikten sonra çözeltiden 25 ml alınıp akabinde 5 ml NaOH (%10) eklenmiştir. Distilasyona tabii tutulan karışım pembemsi renk gözleninceye dek titre edilmiş ve formülasyonla TVB-N değeri mg/100 g olarak hesaplanmıştır [24].

3.6. Tiyobarbitürik Asit (TBA) tayini miktarı analizi

Bu analiz Tarladgis [25]'e yöntemine göre yapılmıştır. Elde edilen homojen karışım Kjeldahal balonuna aktarıldıktan sonra 2,5 ml 4 N hidroklorük asit (HCI), 47,5 mL saf su ve silikon yağı ilave edilmiştir. Destilasyon işlemine tabii tutulan örneklerin üzerine 0,02 M tiyobarbütirik asit standart çözeltiden ilave edilerek su banyosuna aktarılmıştır. Ardından inkübasyondan (95-100°C'de 35 dk) sonra örnekler soğutularak köre karşı 538 nm dalga boyunda okunmuş ve mg/kgMDA olarak belirlenmiştir [26].

3.7.pH ölçümü

Sos örneğinden 1:10 oranında saf su ile Ultra Turrax ile homojenize edildikten sonra oda sıcaklığından (25 ± 2 °C) HACH TitraLab AT1000 marka pH metre ile ölçülmüştür [27].

4. Duyusal analiz

Bu analizler yedi panelist tarafından gerçekleştirilmiştir. Balık sosu örneklerinin duyusal özellikleri yaklaşık yüzde altmış erkek, yüzde kırk kadın olan bir panelist grubu tarafından belirlenmiştir. Değerlendirmede koku, yağlılık, tuzluluk, acılık, sululuk, aroma, görünüm, genel kabul gibi kriterler temel alındı. Her özellik için 0-100 puanlık bir grafik ölçeği kullanılmıştır [28].

5. Mikrobiyolojik analizler

Depolanan soslarda maya-küf, psikrotrofik, toplam aerobik mezofilik, laktik asit ve Enterobacteriaceae bakterileri için mikrobiyolojik analizler yapılmıştır. Steril şartlarda

gerçekleştirilecek analizler için 25 g örnek alınarak 225 mL serum fizyolojik suda Stomacher'de homojen hale getirilmiştir. Hazırlanan bu homojenattan uygun dilüsyonlar hazırlanarak her bakteri türü için özel besi yerleri ve inkübasyon şartları dikkate alınarak analizler yapılmıştır (Tablo 3) [5, 6, 20, 29, 30].

Tablo 3. Bakteri grupları ve inkübasyon ortamları

Bakteri grubu	**Besi yeri**	**İnkübasyon şartları**
Toplam aerobik mezofilik bakteri	Plate Count Agar (PCA, Merck)	37 °C'de 2 gün aerobik koşullarda
Psikrotrof bakteri sayımı	Plate Count Agar (PCA, Merck)	10 °C'de 7 gün aerobik koşullarda
Laktik asit bakteri sayımı	De Man Ragose Sharpe Agar (MRS, Merck)	30 °C'de 2 gün anaerobik koşullarda
Enterobacteriaceae sayımı	Violet Red Bile Dekstrose Agar (VRBD. Merck)	30 °C'de 2 gün anaerobik koşullarda
Maya-küf	Potato dextrose agar (PDA)	22±1 °C'de 5 gün anaerobik koşullarda

6. Bulgular

Çalışmada depolama süresi boyunca balık sosuna ait pH, TVB-N, TBA, kuru madde, kül, tuzluluk, asitlik miktarı ve renk (L*, a* ve b*) gibi kimyasal analiz bulguları (Tablo 4)'de, duyusal analiz sonucuna ait değerler ise (Şekil 2)'de verilmiştir. Depolama zamanı dikkate alındığında balık sosuna ait pH değeri başlangıçta 4,42±0,10 iken 2. ayda 3,31±0,04 olarak asitlik miktarının artışıyla uyumlu bir değer tespit edilmiştir. TVB-N ve TBA değeri ise 2. ayda sırasıyla 16,19±1,00 mg/100g ve 0,556±0,03 mg/kgMDA olarak bulunmuştur. Renk değerlerini temsil eden L*, a* ve b* değerleri ise başlangıç değerlerine göre 2. ayda azalış gösterdiği tespit edilmiştir.

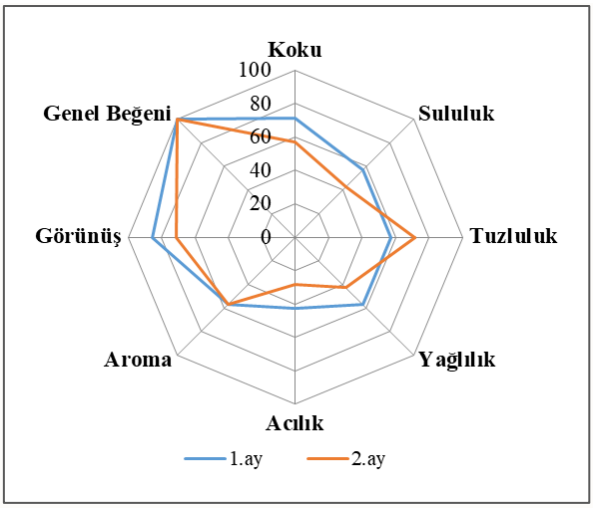
Tablo 4. Depolama süresi boyunca balık sosuna ait kimyasal analiz sonuçları

Parametreler	**Depolama Süresi**	
	1. Ay	**2. Ay**
pH	4,42±0,10	3,31±0,04
TVB-N(mg/100g)	14,08±1,99	16,19±1,00
TBA(mg/kgMDA)	0,263±0,01	0,556±0,03
Kuru Madde (%)	16,92±0,36	18,91±0,34
Kül (%)	4,68±0,02	4,28±0,00
Tuzluluk	7,17±0,21	7,46±1,03

Tablo 4 (devamı)

Asitlik Miktarı	1,50±0,05	5,50±2,06
L*	17,04±4,88	13,47±1,10
a*	13,34±2,82	10,65±0,49
b*	19,19±3,67	15,22±1,13

Bununla birlikte yapılan mikrobiyolojik analizlerde ise toplam aerobik mezofilik, psikrotrof, laktik asit, Enterobacteriaceae bakterileri ve maya-küf popülasyonları saptanabilir sınırın altında belirlenmiştir (<2 log kob g^{-1}). İstatistiksel analizlerde zamanın kimyasal parametrelerde (pH, TVB-N, TBA, kuru madde, kül, asitlik, L*, a* ve b* değerlerinde) $p<0,05$ seviyesinde etkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. Depolama süresi boyunca balık sosuna ait duyusal analiz sonuçlarının radar grafikle gösterimi

Yapılan istatistiksel analizler sonucunda modül başına puanlar ortalama ± standart sapma olarak analiz edildi. Analiz parametreleri ile zaman arasındaki karşılaştırma daha sonra student-t testi kullanılarak istatistiksel olarak ($p<0,05$) test edildi.

7. Tartışma ve sonuç

Bu çalışma doktora ders çıktısı olarak üretilmiş ve bu tarz çalışmalar için bir modelleme ve motivasyon çalışması olarak sunulmuştur. Balık sosları ile yapılan çalışmaların (raf ömrü, tüketici beğenisi, kalite) sınırlı araştırma bulguları nedeniyle bu bölümde kısıtlı bilgi verilmiştir. Bu bilgilerde bir modelleme çalışması olarak kurgulanmış ve gelecek çalışmalara referans olma potansiyelini yerine getirecek şekilde değerlendirmeler yapılmıştır.

Balık atıkları ve balık işleme yan ürünleri, işleme endüstrisinden kolayca toplanabilmelerine ve ekonomik olarak rekabetçi ve değerli yan ürünlere dönüştürülme konusunda büyük bir potansiyele sahip olmalarına rağmen, beklenilen ilgiyi hala görmemektedir [31].

Mikrobiyal aktivite, balık kalitesinde sınırlayıcı bir faktördür ve toplam aerob mezofilik bakteri sayısı da aynı kabul edilebilirliğin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Elde edilen bulgularda mikrobiyolojik ekim sonuçlarında koloni oluşturulan birim sayısının tespit edilir sınır altında (<2 log kob g^{-1}) olması sos içeriği ve yapılan konserveleme işlemi ile açıklanabilir. Tat ve aroma amaçlı kullanılan ve özellikle de antiseptik özelliği ile bilinen sarımsak, kükürt içeren organik bileşiklere sahip olup çok düşük konsantrasyonlarda bile bakterilere karşı geniş antimikrobiyal özelliklere sahiptir. Bu özellik sülfür bileşikleri olan allisin veya diyalil disülfürden kaynaklanmaktadır [32]. Bilinen bir durum olarak allisinin serbest bırakılmasında düşük pH önemli etkiye sahiptir [33].

Zamanla fermantasyon uzadıkça pH değeri düşerek laktik asit bakterileri için uygun bir ortam sağlanır. Fermantasyonun ilerleyen aşamalarında balık sosundaki çözünmüş oksijen tükendikçe mikroorganizmaların çeşitliliği ve miktarı azalır [34].

Mikrobiyolojik bulguların paralelinde TVB-N sonuçlarında depolama süresince düşük TVB-N değerleri söz konusu üründeki bakteriyel aktivitenin inhibisyonu ile açıklanabilir ve mikrobiyolojik çıktılarla uyumludur. Depolama zamanına paralel olarak pH değeri azalan bir eğilim göstermiş olsa da TVB-N daha yüksek belirlenmiştir. Araştırma bulgularımız, depolama süresi boyunca tüm gruplarda TBA değerinin arttığını ortaya koymuştur. Bu eğilimin, ikincil ürünlerden aldehitler gibi hidroperoksitlerin üretiminden kaynaklı kaslardaki serbest demir ve diğer peroksitlerin artışından kaynaklanabileceği düşünülmektedir [3]. Benzer değişimler [35], TBA değerleri ve mikrobiyal değişimlerin et ürünlerinin bozulma oranını etkileyen biyoaktif bileşenlerle ilgili olabileceğini bildirmişlerdir.

Asitleştirme, balığın fermantasyonunda kritik bir süreçtir. Çalışmamızda başlangıç maddeleri eklenmiş gökkuşağı alabalığı fileto kırpıntıları ile hazırlanan sosun pH'sı 4,42'den yaklaşık 3,31'e düştü; bu değişiklik, dikkat çekicidir çünkü daha düşük bir pH değeri, fermente balıklarda daha iyi gıda güvenliği ile ilişkilendirilir. Balık ürünlerinin çiğ tüketimi için pH' nın 4,4'ün altında olduğu ürünler güvenli kabul edilir [34].

Tazelik, tüketicinin görünüm, doku ve tat algılarıyla doğrudan bağlantılı olduğundan balık kalitesinin en önemli yönlerinden biridir [30]. Renk gıda materyallerinin kabul edilebilirliği ve tüketilebilirliği noktasında nemli rol oynayan bir kalite parametresidir [36]. Ürünün istenen yüzey rengi çoğu zaman albeniyi artırmanın yanı sıra gıda matrisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar hakkında da fikir sahibi olmayı sağlamaktadır [37]. L* değerinin azalması balık sosunda küçük peptitler ve serbest amino asitlerin varlığını, benzer olarak b* değerlerinde tespit edilen azalış, fermantasyon aktivitesinden ve Millard reaksiyonundan kaynaklanan moleküllerin varlığı veya yokluğundan kaynaklanabilir [38]. Balık sosu ile yapılan farklı çalışma bulguları mevcut renk verilerimizle uyumludur [39, 40]. Fermantasyon sırasında balık sosu renk değişikliklerini kontrol edilmesi kadar duyusal verilerde önemlidir.

Elde edilen organoleptik sonuçlarda hazırlanan sosun genel beğenisinin yüksek ve tercih edileceğini göstermiştir. Bu eğilim proteinin yeterli hidrolizinden, serbest amino asitlerin oluşmasından ve fermantasyon sırasında aroma maddelerinin oluşmasından kaynaklanabilir [38]. Soslarda belirlenen fiziko-kimyasal değişime bağlı olarak organik asitlerin birikmesi fermente gıdalara önemli faydalar sağlar. Bu sadece bozulmayı ve patojen mikroorganizmaların büyümesini engellemekle kalmaz, aynı zamanda gıdanın

lezzetini ve dokusunu geliştirmede önemli bir rol oynar. Bu nedenle organik asit birikim oranının arttırılması, fermente gıdaların kalitesinin artırılmasına yönelik olumlu bir süreçtir. Tuz, fermente balık üretiminde en yaygın kullanılan hammaddelerden biri olup, bozulmaya neden olan mikroorganizmaların ve patojenlerin inhibisyonunda etkilidir. Bu antimikrobiyal etkinin yanı sıra, fermente balığın kendine özgü lezzetinin gelişmesine önemli ölçüde katkıda bulunarak tadını da arttırır [34].

Mevcut çalışma "FBSUÇ618 kodlu Akuakültürde Atıklar ve Atık Yönetimi" başlıklı doktora dersi kapsamında *motivasyon* ve *modelleme* çalışması olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgularda, fileto kırpıntıları kullanılarak hazırlanan balık soslarında duyusal analiz verilerinin farklı kombinasyonlarla entegre edildiğinde ürün çeşitliliğine ve tüketici beğenisine olumlu etki gösterebileceği, alım/tüketim potansiyelinin olduğu ortaya konulmuştur.

Raf ömrünün dikkate alınması nedeniyle daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu ve bu çalışmalarda özellikle tuz ve acı değerlerinin düşük konsantrasyonların denenmesi önerisi çalışma verimiz olarak sunulabilir. Bununla birlikte etkinliğinin ortaya konulması adına farklı konsantrasyon ve entegrasyonlarla farklı baharat, sebze ve teknolojilerin (işlenmiş-işlenmemiş) çalışılması gerekmektedir. Yine bu yaklaşım, beraberinde artan çevre bilinci, doğal maddeler kullanılarak üretilen katma değerli ürünlere yönelik ilgiyi beslerken, bu yaklaşım sayesinde çevre kirliliğinin önüne geçilmesi ve atık miktarının azaltılması sağlanacaktır.

Teşekkürler

Mevcut çalışmanın planlanıp, sürdürülmesinde katkı ve desteklerini esirgemeyen Atatürk Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dekanlığı ile Atatürk Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi öğretim üyesi Sayın Dr. Öğr. Üyesi Esat Mahmut Kocaman'a ve Su Ürünleri Fakültesi İçsu Balıkları Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] Dissanayake K, Rifky M, Nurmukhamedov K, Makhmayorov J, Abdullayev B, Farmanov J, Samadiy M. 2024. A comparative analysis of traditional meat processing methods. In E3S Web of Conferences (Vol. 494, p. 04023). **EDP Sciences**.

[2] Alak, G., Guler, K., Uçar, A., Parlak, V., Kocaman, EM., Yanık, T. ve Atamanalp, M., 2019. Quinoa as polymer in edible films with essential oil:Effects on rainbow trout fillets shelf life. **Journal of food processing and preservation**, 43(12), e14268.

[3] Yumuk H, Alak G, Yanık T. 2019. Effects of chitosan with vegetable oil on shelf life of brown trout (*Salmo trutta fario*) fillets fed on prebiotics. **Journal of food safety**, 39(5), e12684.

[4] Güler K, Yanık T, Alak G. 2024. Investigations on the shelf life of rainbow trout fillets covered by quinoa biofilms enriched with different essential oils (*Nigella sativa* and *Mentha piperita*). **Food Science and Technology International**, *30*(3), 251-259.

[5] Alak, G., Uçar, A., Parlak, V., Türkez, H., Kocaman, EM. ve Atamanalp, M., Abd El-Aty AM. 2023. Effect of coating with chitosan enriched with different borates on the shelf life of fish fillet. **Journal *of the Science of Food and Agriculture***, *103*(9), 4340-4350.

[6] Beddows, CG., 1985. Fermented fish and fish products. Microbiology of Fermented Foods. Vol.2, Brian J.B. Wood, Ed. **Elsevier Applied Science Publishers** LTD, England, ISBN: 0-85334-333-0.

[7] Van Veen AG. 1965. Fermented and dried seafood products in South-east Asia. In: Fish as Food Vol. 3. ed. G. Borgstrom, p. 227-250. **London, Academic Press**.

[8] Pedersen, G, Skjerdal, T. 2000.Utilisation of waste from the salt fish industry inproduction of fermented fish sauce and other possible products. In: Proceedings of Journal Of Aquatıc Food Product Technology 29th Wefta Meeting. S.A. Georgakis (Ed.) pp. 392-394. **Greek Soc. of Food Hygienists and Technologists**, Thessaloniki

[9] Gildberg, A, Thongthai, C. 2001. The effect of reduced salt content and addition ofhalo-philic lactic acid bacteria on quality and composition of fish sauce made fromsprat. **J. Aquatic Food Product Technol. 10: 77-88.**

[10] Aquerreta, Y, Astiasaran, I, Bello, J. 2002. Use of exogenous enzymes to elaborate the Roman fish sauce "garum." **J. Sci. Food Agric. 82: 107-112.**

[11] Lopetcharat, K, Park, JW. 2002. Characteristics of fish sauce made from Pacificwhiting and surimi by-products during fermentation stage. **Food Chem. Toxicol.67: 511-516.**

[12] Tungkawachara S, Park, JW, Choi, YJ. 2003. Biochemical properties and consumer acceptance of Pacific whiting fish sauce. **J. Food Sci. 68: 855-860.**

[13] Dissaraphong, S, Benjakul, S, Visessanguan, W, Kishimura, H. 2006. The influence of storage conditions of tuna viscera before fermentation on the chemical, physical and microbiological changes in fish sauce during fermentation. **Bioresource technology, 97(16), 2032-2040.**

[14] Yousefi A, Guo H, Dev S, Liko B, Lafrance S. 2022. Effects of ammonia energy fraction and diesel injection timing on combustion and emissions of an ammonia/diesel dual-fuel engine. **Fuel, 314, 122723.**

[15] TÜİK. 2019. Türkiye İstatistik Kurumu, Su Ürünleri 2019. https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=su%20%C3%BCr%C3%BCnleri&dil=1 Erişim tarihi: 25 Mayıs 2024

[16] Öz M, Şahin D, Karslı Z, Aral O, Bahtiyar M. 2021. Investigation of the use of zeolite (Clinoptilolite) as aquarium filtration material for electric blue hap (*Sciaenochromis ahli*). **Marine Science and Technology Bulletin**, ***10*(2), 207-212.**

[17] Vásquez P, Sepúlveda CT, Zapata JE. 2022. Functional properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) viscera protein hydrolysates. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 39, 102268**

[18] Gökalp HY, Kaya M, Tülek Y, Zorba Ö. 2001. **Et ürünlerinde kalite kontrolü ve laboratuvar uygulama kılavuzu (4. Baskı)**. Atatürk Üniv. Yayın No:751, Zir. Fak. Yay. No:318, Ders Kitapları Serisi No:69, Ziraat Fak. Ofset Tesisi, Erzurum.

[19] Atamanalp, M., Uçar, A., Kocaman, EM. ve Alak, G., 2021. Evaluation of brown trout (*Salmo trutta fario*) fillets' shelf life: Fed with a humic supplemented diet. **Food Packaging and Shelf Life, 29, 100675**.

[20] Kara A, Akköse A, Gelen SU, Uçar A, Parlak V, Kocaman EM, Alak G. 2024. A solution for fillet quality: Slaughter age's effect on protein mechanism and oxidation**. Heliyon, 10(10).**

[21] Dericioğlu BN, Alak G, Atamanalp M. 2019. Determining protein denaturation of sardine (*Sardina pilchardus*) marinates before and after the maturation. **Journal of Food Processing and Preservation**, *43*(9), e14059.

[22] Malle P, Tao SH. 1987. Rapid quantitative determination of trimethylamine using steam distillation. **Journal of Food Protection**. 50(9). 756-760.

[23] Alak, G., Kara, A., Akköse, A., Gelen, SU., Tanas, ŞT., Uçar, A. ve Atamanalp, M., 2024. Effect of climate change on fillet quality and shelf-life of *Oncorhynchus mykiss* under controlled conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, *104*(3), 1511-1520

[24] Tarladgis BG, Watts BM, Younathan MT, Dugan L. 1960. A distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods. **Journal of the American Oil Chemists Society,** 37, 44-48.

[25] Smith CA, Mitchinson MJ, Aruoma OI & Halliwell B. 1992. Stimulation of lipid peroxidation and hydroxyl-radical generation by the contents of human atherosclerotic lesions. **Biochemical Journal**, 286(3), 901-905.

[26] Işık A, Atamanalp M, Alak G. 2020. Evaluation of antioxidant level and protein oxidation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during rigor and post-rigor. **Journal of Food Safety**, 40(1), e12746.

[27] Altug, T. ve Elmacı, Y., 2005. Duyusal Analiz Teknikleri. **Meta Basım**, İzmir. 150s.

[28] Korkmaz F, Parlak V, Kaynar Ö, Uçar A, Alak G, Atamanalp M. 2019. Effect of natural preservatives on protein degradation, microbiological and chemical alterations in rainbow trout fillets. Pakistan J. Zool., 51(2), 405-412

[29] Ceylan Z, İnanlı AG, Basahel A, Karaboğa D, Yılmaz MT. 2024. Determination of microbiological quality of boiled crayfish samples treated with chitosan. **Annals of Animal Science.** DOI: 10.2478/aoas-2024-0002

[30] Duta L, Dorcioman G, Grumezescu V. 2021. A review on biphasic calcium phosphate materials derived from fish discards. Nanomaterials, 11(11), 2856.

[31] Amerian, M., Khoramivafa, M., Palangi, A., Gohari, G. ve Ntatsi G. 2024. Antioxidant and Antimicrobial Properties of Garlic as Affected by Nitrogen and Selenium Concentrations. **Journal of Medicinal plants and By-Products**.

[32] Bhattacharya ,S., DasChowdhury, S., 2024. Entrapment of bioactive organosulfur allicin from garlic in polyoxyethylene based micelle carrier system for enhanced shelf-life: in vitro release kinetics and in silico analysis.

[33] Cai, H., Tao, L., Zhou, X., Liu, Y., Sun, D., Ma, Q. ve Jiang, W., 2024. Lactic Acid Bacteria in Fermented Fish: Enhancing Flavor and Ensuring Safety**.** ***Journal of Agriculture and Food Research***, 101206.

[34] Dua S, Bhat ZF, Kumar S. 2015. Effect of lemon peel extract on the oxidative stability and storage quality of Tabak-Maz, traditional fried mutton ribs. **Nutrition & Food Science**, 45(5), 662-676

[35] El-Gendy NM, Amer A, Ibrahim HA. 2024. Physico-Chemical and Sensory Assessment of Local and Imported Catfish Fillets. **Alexandria Journal of Veterinary Sciences**, 80(1).

[36] Akça, EE. ve Beylikçi, SC., 2022. "Bireysel Hızlı Dondurma (IQF) İşleminin Kırmızı Eriklerde Fiziksel Kalite Parametrelerine Etkisi. ***Meyve Bilimi***, 9.2: 23-28.

[37] Ghayoomi H, Edalatian Dovom MR, Habibi Najafi MB, Pourfarzad A. 2024. The principal component analysis of key and significant features of the safety and nutritional value of Mahyaveh sauce**.** ***Food Science & Nutrition***, *12*(4), 2896-2907.

[38] Dissaraphong S, Benjakul S, Visessanguan W, Kishimura H. 2006. The influence of storage conditions of tuna viscera before fermentation on the chemical, physical and microbiological changes in fish sauce during fermentation. **Bioresource technology**, *97*(16), 2032-2040.

[39] Klomklao S, Benjakul S, Visessanguan W, Kishimura H, Simpson BK. 2006. Effects of the addition of spleen of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) on the liquefaction and characteristics of fish sauce made from sardine (*Sardinella gibbosa*). **Food Chemistry**, *98*(3), 440-452.

DOI:10.25092/baunfbed. 1527387 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 762-779, (2025)*

Antibiyofilm aktivitenin değerlendirilmesinde kullanılan *in vitro*-statik testler

Simay ALDAĞ[1,2], Ayşenur YAZICI[*1,2]

[1]Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Erzurum, Türkiye.
[2] Erzurum Teknik Üniversitesi, Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Moleküler Mikrobiyoloji Laboratuvarı, Erzurum, Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 02.08.2024
Kabul Tarihi (Accepted Date): 02.06.2025

Öz

Biyofilmler, genellikle farklı mikroorganizma türlerini ve bunların salgıladıkları polisakkaritleri, ekstrasellüler DNA (e-DNA)'yı ve proteinleri içeren yapılardır. Günümüzde insan enfeksiyonlarının %80'inden fazlasının biyofilm kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle, yeni antibiyofilm ajanların araştırılması ve biyofilm direnç mekanizmalarının anlaşılması oldukça önemlidir. Biyofilm oluşumları birçok faktör tarafından etkilendiği için uygun yöntem seçimi kritik öneme sahiptir. Bu derleme çalışmasının amacı, biyofilm çalışmalarında, antibiyofilm ajanların araştırılmasında ve biyofilmlerin moleküler yapılarının incelenmesinde kullanılan statik yöntemler hakkında bilgi vermektir. Tüm klinik çalışmalara uygun ideal bir biyofilm çalışma yöntemi bulunmamakla birlikte, bu derleme çalışmasında, doğal veya sentetik moleküllerin araştırılmasında kullanılan mevcut in vitro-statik yöntemler özellikleri, avantajları ve dezavantajları ile ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: *Biyofilmler, statik yöntemler, biyofilm analiz yöntemleri, antibiyofilm aktivite yöntemleri.*

In vitro-static tests used to evaluate antibiofilm activity

Abstract

Biofilms are structures that usually contain different species of microorganisms and secreted polysaccharides, extracellular DNA (e-DNA) and proteins. It is currently estimated that over 80% of human infections involve biofilm-associated microorganisms. Therefore, it is very important to discover new antibiofilm agents and understand biofilm

[*]Simay ALDAĞ, simay.aldag84@erzurum.edu.tr, https://orcid.org/0009-0006-5282-1945
Ayşenur YAZICI, aysenur.ozdemir@erzurum.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3369-6791

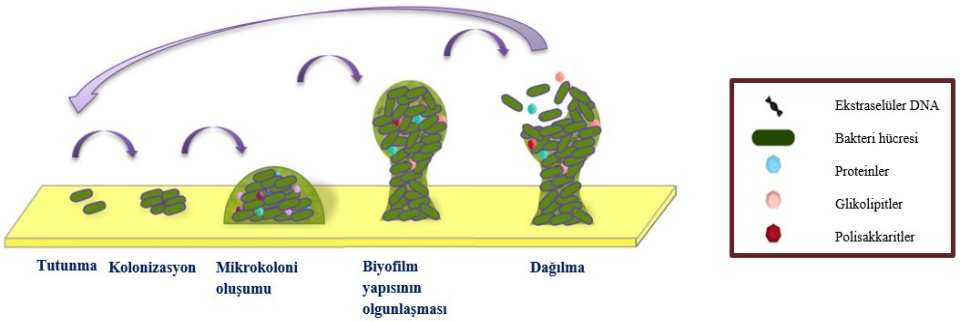
resistance mechanisms. Given that biofilm formation is influenced by various factors, selecting an appropriate method is essential for such studies. The aim of this review is to provide information about methods used in biofilm studies, the search for antibiofilm agents, and examinations of the molecular structures of biofilms. Although there is no ideal biofilm study method suitable for all clinical applications, this review presents the features, advantages, and disadvantages of current in vitro static methods used to evaluate natural or synthetic compounds.

Keywords: *Biofilms, static methods, biofilm analysis methods, antibiofilm activity methods.*

1. Giriş

Biyofilmler, bir veya birden fazla mikroorganizma türünü ve bunların salgıladıkları polisakkaritleri, ekstrasellüler DNA (e-DNA)'yı ve proteinleri içeren hücre topluluklarıdır [1]. Bakteri, fungus ve parazitler genellikle biyofilm oluşturduğu bilinen mikroorganizmalardır [1-2]. Biyofilm tabakasındaki hücreler, kendi oluşturdukları glikokaliks veya ekzopolimerik matriks (EPS) içerisinde gömülü olarak bulunurlar. Protein, polisakkarit, nükleik asit ve lipitlerden oluşan EPS, biyofilm yapısına üç boyutlu bir görünüm ve dayanıklılık sağlar [3]. Biyofilmler endüstriyel borular gibi abiyotik yüzeylere, implant, kontakt lens, sonda gibi biyomalzemelere ve bitki, hayvan dokuları gibi biyotik yüzeylere tutunarak veya yüzeyle ilişkili agregat halinde bulunurlar [3-4].

Biyofilm oluşumu genel olarak dört safhada gerçekleşir (Şekil 1). İlk aşama planktonik haldeki hücrelerin yüzeylere temas ve tutunmalarının gerçekleştiği aşamadır. Bu aşama, geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz tutunma olarak iki şekilde gerçekleşir. İkinci aşamada, yüzeye geri dönüşümsüz olarak tutunan hücreler EPS moleküllerinin salınımını gerçekleştirir ve bu hücreler mikrokoloni oluştururlar. Üçüncü aşamada, çoğunluğu algılama (quorum sensing, QS) mekanizmalarının devreye girmesi ve gen ekspresyonlarının değişimi ile mikrokoloni oluşumu ve hücre çoğalması gerçekleşir. Hücreler arasında besin ve su taşınımı için mikrokanallar oluşur. Son aşama olarak mikrokoloniden kopmalar sonucu dağılma meydana gelir ve yeni bir biyofilm oluşum süreci başlayabilir [1-3].



Şekil 1. Biyofilm oluşumu aşamaları. ([5]'den modifiye edilmiştir)

Biyofilm üzerine yapılan çalışmalar, biyofilmlerin insan sağlığı üzerine olumsuz etkileri sebebiyle son yıllarda hızla artmıştır. Dünya genelinde görülen enfeksiyonların %80'inden fazlası biyofilm kaynaklıdır [6]. Biyofilm tabakasındaki hücreler, planktonik

hücrelere göre biyokimyasal ve moleküler olarak farklı özellikler sergiler. Örneğin, planktonik hücrelerden farklı olarak, biyofilm hücreleri antibiyotiklere karşı 10-1000 kat daha dirençlidir [6-9]. Bu durum, antibiyotiklerle yapılan tedavilerin başarısız olmasına sebep olmaktadır. EPS moleküllerinin antibiyotikler için bariyer oluşturması, hücrelerin besin azlığından dolayı yavaş büyümesi, stres faktörlerinin aktivasyonu, gen ekspresyon değişimleri, QS mekanizmalarının devreye girmesi gibi çeşitli nedenler biyofilmlerin farklı özellikler sergilemesine sebep olmaktadır [10]. Biyofilmler, plazmidlerin ve hareketli DNA elementlerinin hücreler tarafından alınabildiği ideal çevreler olması bakımından da dirençli mikroorganizmaların oluşumunda etkili olan yapılardır [11-12]. Yeni antibiyofilm ajanların tespit edilmesi ve biyofilm direnç mekanizmalarının anlaşılması biyofilmlerle mücadelede oldukça önemlidir. Ayrıca, mikroorganizmalar, bitkiler ve hayvanlar tarafından üretilen metabolitlerin antibiyofilm özelliklerinin incelenmesi güncel bir konudur. Birçok araştırmacı, doğal metabolitlerin antibiyofilm içeriklerini incelemektedir. Bununla birlikte, henüz klinikte ve biyofilm ile ilişkili enfeksiyonların tedavisinde standartlaştırılmış biyofilm duyarlılık testleri mevcut değildir [13]. Araştırmalarda genellikle statik ve dinamik (akış sistemleri) olmak üzere farklı *in vitro* biyofilm çalışma yöntemleri mevcuttur [14-15]. Tablo 1'de statik ve dinamik yöntemlerin karşılaştırması verilmiştir.

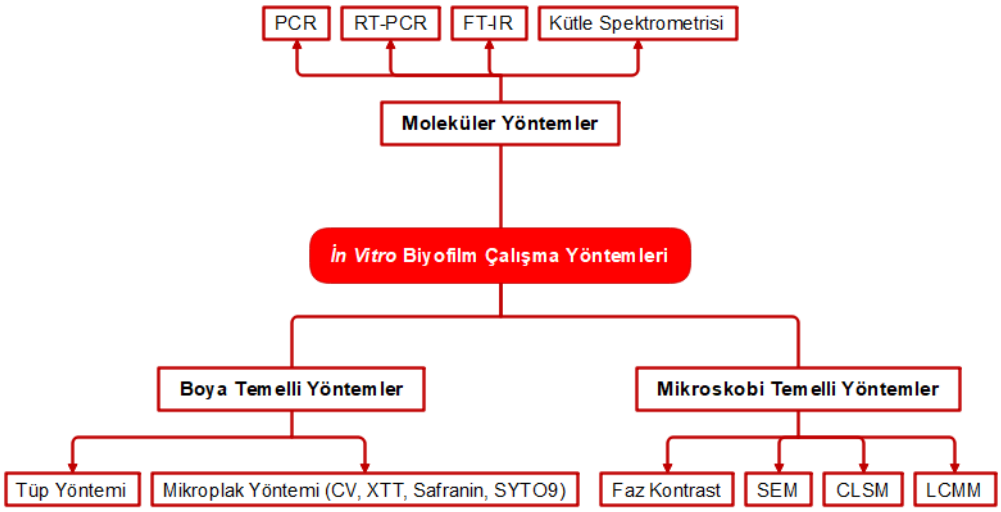
Tablo 1. *In vitro* biyofilm çalışma yöntemleri.

	Uygulama Alanları	**Avantajları**	**Dezavantajları**
Statik Yöntemler	• Biyofilm oluşum kapasitelerinin incelenmesi • Antibiyofilm bileşiklerin araştırılması • Minimum biyofilm inhibitör konsantrasyonunun (MBİK) belirlenmesi	• Kolay uygulama ve hızlı olması • Düşük kontaminasyon riski taşıması • Aynı anda çok sayıda mikroorganizmanın çalışılabilmesi • Özel ekipman gerektirmemesi • Düşük maliyet	• Doğal biyofilm yapısına uygun olmaması • Uzun süreli biyofilm çalışmalarına uygun olmaması • Birbirlerine gevşek bir şekilde bağlı hücrelerin oluşturduğu biyofilmlerin incelenmesinin zor olması • Çökelmeye meyilli olması • Farklı kültür koşulları ile değişiklik göstermesi • Havalandırmanın eksikliği
Dinamik Yöntemler	• Biyofilm büyümesinin incelenmesi • Yüzey malzemesinin biyofilm oluşumu üzerindeki etkilerinin incelenmesi	• Homojen biyofilm oluşumunun sağlanması • Doğal biyofilm yapısının taklit edilebilmesi • Uzun süreli biyofilm yapısının incelenebilmesi	• Aynı anda sınırlı sayıda mikroorganizmanın çalışılabilmesi • Özel ekipman gerektirmesi (Reaktör, pompa sistemleri vb.) • Teknik deneyim gerekmesi • Yüksek maliyet

Bu çalışmanın amacı, biyofilm çalışmalarında, antibiyofilm ajanların taranmasında ve biyofilmlerin moleküler yapılarının incelenmesinde kullanılan *in vitro*- statik yöntemler hakkında bilgi vermektir. Bu nedenle, bu derleme çalışmasında, doğal veya sentetik moleküllerin tanımlanmasında kullanılan *in vitro* statik yöntemler sunulmuştur.

1.1 In vitro-statik biyofilm çalışma yöntemleri

Statik biyofilm çalışma yöntemlerinin, akış biyofilm sistemlerine göre birçok avantajlı yönü vardır. Bunlar, basit, kısa zamanlı, ucuz ve özel ekipmana gerek duymamasıdır [15]. Bu nedenle statik yöntemler (Şekil 2), antibiyofilm moleküllerin taranmasında veya biyofilm oluşturan türlerin belirlenmesinde en sık tercih edilen yöntemlerdir [16-17].



Şekil 2. *In vitro*'da kullanılan statik antibiyofilm çalışma yöntemleri.

Antibiyofilm aktivitenin tanımlanmasında, tüp dilüsyon ve mikroplak yöntemleri kullanılır [18]. Bunun yanında klinik izolatların biyofilm oluşturup oluşturmadığının belirlendiği, kongo kırmızısı içeren agar besiyerleri sıklıkla kullanılan yöntemler arasındadır [19]. Biyofilm yapısının görüntülenmesine yönelik çalışmalar, mikroskoplar aracılığı ile yapılırken, biyofilm yapısında meydana gelen değişimlerin incelenmesi için moleküler yöntemlerden PCR çeşitleri, FT-IR, kütle spektroskopisi gibi teknikler kullanılmaktadır [20-23].

2. Boya temelli testler

2.1. Tüp yöntemi

En eski ve geleneksel yöntemlerden olan tüp yöntemi, biyofilm oluşumunun nitel değerlendirmesidir. Bu yöntemde tüp içerisinde belirli bir süre inkübe edilen bakteriler çıkarılarak, tüp yüzeyi tripan mavisi veya safranin ile boyanır (Şekil 3.A). Fiksasyon sonrası tüp yüzeyinde oluşan renk, skorlama yöntemi ile değerlendirilir. Hava-sıvı ara yüzeyinde oluşan halka ise değerlendirmeye katılmaz [24].

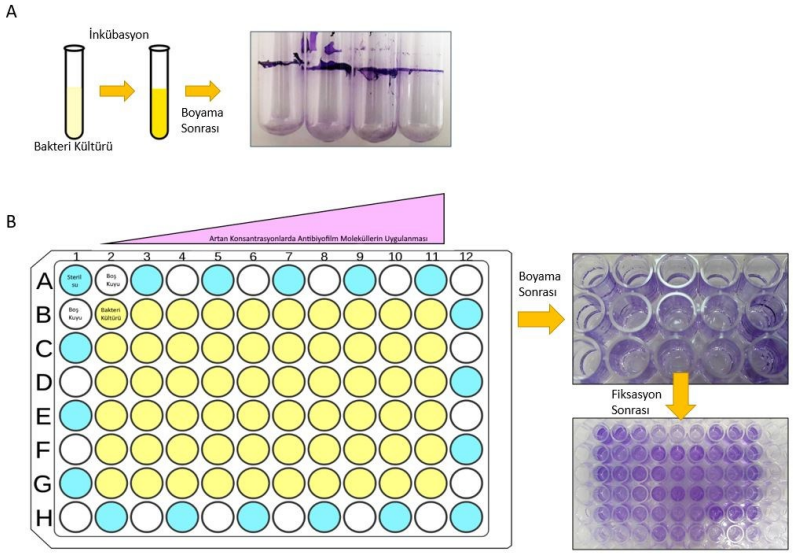
2.2. Mikroplak yöntemi

Mikroplak yöntemi, kolorimetrik metodolojilere dayanan antibiyofilm aktivitesi için Klinik Laboratuvar ve Standartlar Enstitüsü (CLSI) M7-A7 belgesinde açıklanan mikrobroth dilüsyon analizine benzer şekilde yapılmaktadır [25]. Mikroplak yönteminde sıklıkla kullanılan boyalar kristal viole (Hexamethylpararosaniline chloride, KV), 2,3-bis-(2-methoxy-4-nitro-5-sulfophenyl)-2H-tetrazolium-5-carboxanilide (XTT) ve safranindir [26].

2.2.1. KV testi

KV, trifenilmetan grubu boyalarından biridir ve biyofilm matrisi içerisindeki EPS bileşenlerine ve hücrelere iyonik etkileşimler yoluyla bağlanmaktadır [27–29]. Basitliği ve düşük maliyeti nedeniyle, antibiyofilm ajanların taranmasına yönelik çalışmalarda yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Literatürde, bu yöntemin çeşitli modifikasyonlarına rastlanmakta olup, laboratuvarımızda optimize edilmiş bir protokol şu şekilde özetlenebilir: Bakteriyel süspansiyonlar 96 kuyulu plaklarda 37 °C'de 24–48 saat inkübe edilir. İnkübasyon süresi sonunda, planktonik hücrelerin uzaklaştırılması amacıyla kuyulardaki besiyeri alınır ve fosfat tamponu ile yıkama işlemi gerçekleştirilir. Ardından, yüzeye tutunmuş olan biyofilm hücreleri KV ile boyanır. Boyama işlemini takiben, plakalar karanlık ortamda 20 dakika inkübe edilir. İnkübasyonun ardından boya uzaklaştırılır ve artan boya kalıntılarının giderilmesi amacıyla kuyular fosfat tamponu ile tekrar yıkanır (Şekil 3.B). Boyanmış biyofilm tabakası, %30'luk asetik asit ile çözülerek çözeltideki boyanın optik yoğunluğu 590 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak ölçülür [28].

Yöntemin uygulanabilirliği yüksek ve maliyeti düşük olmakla birlikte, KV canlı ve ölü hücreleri ayırt edemediğinden biyofilmin canlılık düzeyine dair hassas bilgi vermez [29]. Bununla birlikte, bu yöntem, biyofilm hücrelerinin mekanik olarak süspanse edilip geleneksel koloni sayım (CFU) analizleriyle desteklenmesi durumunda, biyofilm hücre sayısındaki değişimleri izlemek için yararlı bir tamamlayıcı araç olarak kullanılabilir [29–30].



Şekil 3. Boya temelli testler. A. Tüp yöntemi. B. Mikroplak yönteminin uygulandığı KV boyaması yönteminin plak dizaynı ve boyama görüntüleri.

KV testi ile bir suşun biyofilm oluşturma kapasitesi de belirlenebilir. Yöntemde, ilk olarak negatif kontrol olarak kullanılan steril besiyerinin KV boyaması ile elde edilen optik dansite ortalaması ve 3xstandart sapma (SD) değerinin toplamı kontrolün optik dansitesi (ODc= OD negatif kontrol+3×SD) olarak belirlenir. En az üç tekrarlı olarak kuyulara inoküle edilen test bakterisinin KV boyaması ile elde edilen optik dansite ortalaması (OD_t), Tablo 2'de gösterildiği gibi hesaplanarak, biyofilm oluşturma kapasitesi zayıf, orta ve kuvvetli olacak şekilde değerlendirilir [30-31].

Tablo 2. Bakterilerin biyofilm oluşturma kapasitelerinin belirlenmesi [28] (OD_t: Test edilen izolatın optik dansitesi; ODc: OD negatif kontrol+3×SD)

Ortalama OD değeri	Biyofilm Üretimi
$OD_t \leq ODc$	Biyofilm üretmez
$ODc < OD_t \leq 2 \times ODc$	Zayıf biyofilm üreticisi
$2 \times ODc < OD_t \leq 4 \times ODc$	Orta biyofilm üreticisi
$4 \times ODc < OD_t$	Kuvvetli biyofilm üreticisi

2.2.2. XTT testi

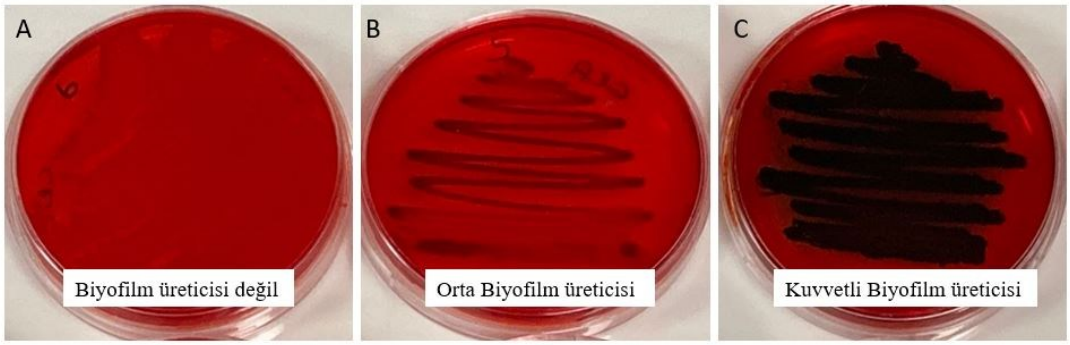
Mikroplak yöntemine dayanan ve biyofilm yapısı içerisinde bulunan hücrelerin canlılık oranlarını tespit etmeye yarayan nicel bir yöntemdir [29]. KV testi ile benzer şekilde yapılmasına rağmen KV testinden farklı olarak, canlı ve ölü hücrelerin ayrımını yapabildiği için üstün özellikler taşımaktadır. Yöntemde, XTT tetrazolium tuzunun, canlı hücrelerin mitokondriyal dehidrogenaz enzimleri tarafından formazan kristallerine dönüştürülmesi gerçekleşir [32-33]. Özellikle maya biyofilmlerinin analizinde kullanılmaktadır [33-34].

2.3. Canlı/ölü testi

Biyofilm tabakasındaki hücrelerin canlılığını ve metabolik aktivitesini değerlendirmek amacıyla florogenik özellikteki nükleik asit boyası SYTO 9 kullanılmaktadır [35]. Ayrıca, ticari olarak hazırlanmış SYTO 9 ve propidium iyodür boyalarının karşımı ile canlı ve ölü hücreler tek bir uygulamada görünür hale gelebilir. Propidium iyodür hasar görmüş veya geçirgenliğini kaybetmiş hücreleri kırmızı renkli boyarken, SYTO 9 boyası canlı hücreleri yeşil renkli olarak boyamaktadır. Bu uygulamalar mikroplaklarda yapılabileceği gibi, konfokal mikroskopisi ile de analiz edilebilmektedir [35-36].

2.4. Kongo kırmızısı agar metodu

Freeman ve arkadaşları tarafından geliştirilen kongo kırmızısı içeren petrilerde bakterilerin geliştirilmesi oldukça pratik ve nitel bir yöntem olmuştur [37]. Kongo kırmızısı boyaması hızlı, tekrarlanabilir ve ucuz bir yöntem olarak, biyofilm oluşturan ve oluşturmayan suşların klinikteki ayrımında sıklıkla kullanılır. Yöntemde biyofilm oluşturan suşlar kırmızından siyaha kadar değişen farklı renklerde koloniler oluştururlar [38]. Şekil 4'te kongo kırmızısı agar içeren petrilerde gelişen farklı *Staphylococcus aureus* izolatlarının görüntüleri verilmiştir. Buradan anlaşılacağı gibi, biyofilm oluşturan hücreleri kuvvetli, orta veya zayıf biyofilm üretici olarak belirlemede yetersiz kalmaktadır ve nicel sonuç verememektedir [39].



Şekil 4. Kongo kırmızısı agar içeren petrilerde gelişen farklı *S. aureus* izolatların görüntüleri.

Kongo kırmızısı agar besiyerinde oluşan renk değişimleri her zaman biyofilm oluşumunun doğrudan göstergesi değildir. Kongo kırmızısı, statik kültürlerde sıklıkla görülen hava-sıvı ara yüzündeki pelikül yapılarını, bazı bakteriler tarafından salgılanan amiloid tipi proteinleri (curli) ve selülozu bağlayarak renk değişimine yol açabilir [40].

2.5. Diğer boyalar

KV, XTT ve SYTO 9 kadar sık kullanılmamakla birlikte fluorescein diacetate (FDA), resazurin, calcofluor white, alcian mavisi, concanavalin A ve 1,9- dimetil metilen mavisi (DMMB) gibi boyalar da biyofilm yapılarının incelenmesinde kullanılır. Tablo 3'de biyofilm araştırmalarında kullanılan boyalar ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. Boya temelli yöntemlerde kullanılan boyaların özellikleri

	Hedef / İşlev	**Avantajları**	**Dezavantajları**
Kristal viole	Tüm biyofilm matrisine ve hücrelere bağlanır. Mor renkli görülür.	Toplam biyofilm miktarını ölçer.	Canlı/ölü hücre ayrımı yapmaz.
Safranin	Hücre duvarı ve EPS yapılarına bağlanır. Kırmızı/turuncu renkte görülür.	Alternatif olarak kristal viole yerine kullanılabilir.	Kristal viole kadar hassas değildir; zayıf biyofilmde düşük duyarlılığa sahiptir.
Kongo kırmızısı	Polisakkarit içeriğine (özellikle amiloid ve curli lifleri) bağlanır. Kırmızı, pembe siyah olarak farklı renkler görülür.	Koloni morfolojisine göre biyofilm ayrımı yapabilir. Pratik yöntemdir.	Subjektif değerlendirme sağlar. Duyarlılığı düşüktür.
XTT	Metabolik aktiviteye sahip hücreleri belirler. İndirgendiğinde turuncu renkte görülür.	Canlı hücre varlığına dayalı; kantitatif renk değişimi oluşturur.	Işık duyarlılığı vardır.
Calcofluor white	β-glukan ve selüloz tipi polisakkaritlere bağlanır. Floresan olarak mavi renkte görülür.	Spesifik EPS yapıları görselleştirilebilir.	Bazı EPS türlerini (örneğin protein, eDNA) göstermeyebilir.
Alcian mavisi	Asidik mukopolisakkaritlere bağlanır. Mavi renkte görülür.	EPS miktarını tahmin etmede kullanılabilir.	Canlı/hücre ayrımı yapamaz; boyama doygunluğu yüksek hassasiyet gerektirir
Concanavalin A-FITC	Glikoprotein ve glikan yapılara (özellikle α-D-mannoz/glukoz) bağlanır. Floresan olarak yeşil renkte görülür.	Concanavalin A spesifik EPS bileşenlerine bağlanır. Fluorescein Isothiocyanate (FITC) ile konjuge edildiğinde floresans görüntülemeye izin verir.	Sadece belirli şeker yapılarına bağlanır.
Fluorescein Diacetate	Canlı hücrelerdeki enzim aktivitesini (esteraz) belirler. Floresan olarak yeşil renkte görülür.	Metabolik olarak aktif hücreleri gösterir.	Oluşan sinyal çabuk azalır.

Resazurin	Hücresel metabolizmayı (redoks potansiyeli) belirler. İndirgendiğinde aktif hücrelerde pembe renkte görülür.	Duyarlılığı yüksektir. Canlı hücreleri ölçer.	Ölü hücreleri göstermez; ışık ve zaman duyarlılığı vardır.
Dimethyl Methylene Blue	Sülfatlanmış polisakkaritlere bağlanır. Mavi/mor renkli görülür.	Kantitatif EPS analizi için kullanılabilir.	Spesifiklik düşüktür; biyofilm heterojenitesine duyarlıdır.
SYTO 9	Hücre zarından geçebilir, nükleik asitlere bağlanır. Floresan olarak yeşil renkte görülür.	Canlı/ölü ayrımı sağlar; Konfokal lazer taramalı mikroskobu ile detaylı analiz yapılabilir.	Floresan mikroskop gerektirir.
Propidyum iyodür (PI)	Zar bütünlüğü bozulmuş ölü hücrelere girerek nükleusu boyar. Floresan olarak kırmızı renkte görülür.	Canlı/ölü ayrımı sağlar; Konfokal lazer taramalı mikroskobu ile detaylı analiz yapılabilir.	Floresan mikroskop gerektirir.

FDA metabolik olarak aktif hücrelerde bulunan esterazlarla yeşil/sarı renkli floresan özellik gösteren bir forma dönüşür [41]. Resazurin ise özellikle maya hücreleri için tercih edilen ve metabolik olarak aktif hücrelerin görüntülenmesinde kullanılan bir boyadır. Alcian mavisi EPS yapısında bulunan asidik polisakkaritleri tespit etmek amacıyla kullanılan önemli boyalardan biridir [42]. DMMB ise ilk olarak glikoaminoglikanları boyamak üzere geliştirilmiş [43], ancak daha sonraki çalışmalarda *S. aureus* biyofilm çalışmalarında kullanılmaya başlamıştır [44]. Ommen ve arkadaşları, düşük toksisitesinden dolayı, KV boyasına alternatif olarak safranin boyasının kullanılmasını önermektedir. Ancak bu boyamanın dezavantajı, düşük optik dansite alınmasıdır [45].
Aynı mikrobiyal suşlar üzerinde yapılan biyofilm araştırmalarında, kullanılan yöntemlere bağlı olarak biyofilm kütlelerinde farklılıklar olduğu bildirilmiştir [46, 47, 48]. Knobloch ve arkadaşları *S. aureus* izolatları için, mikroplak yöntemi, tüp yöntemi ve kongo kırmızısı agar yöntemini karşılaştırmışlardır [46]. Sonuçlara göre, *ica* geni pozitif 128 *S. aureus* izolatının mikroplak yönteminde %57,1'inin biyofilm oluşturabildiği belirlenmiştir. Tüp testi, güçlü biyofilm üreticilerini ayırt etmede mikroplak yöntemi ile yüksek oranda örtüşmüş, ancak zayıf biyofilm üreticilerinde yeterince ayrım yapamamıştır. Kongo kırmızısı agar yönteminde ise yalnızca %3,8 oranında mikroplak ve tüp testi ile uyum göstermiş ve bu nedenle biyofilm tespitinde güvenilir bir yöntem olarak değerlendirilmemiştir [46]. Hassan ve arkadaşlarının yapmış olduğu benzer bir çalışmada ise bu üç yöntem klinik izolatlar üzerinde incelenmiştir. 110 klinik izolat ile yaptıkları bu çalışmada mikroplak yönteminin biyofilm tespiti açısından tüp ve kongo kırmızısı agar yöntemlerine kıyasla daha kantitatif ve güvenilir olduğunu göstermiştir [47]. Benzer şekilde bizim laboratuvar çalışmalarımızda da kongo kırmızısı agar yöntemi ile mikroplak yöntemi arasında uyum görülmemiştir.

Walker ve Horswill'in önerdikleri lamel-temelli (Coverslip-based) bir teknik, farklı boyalara uygulanabilirliği ve *in vivo* ortama benzerliği nedeniyle dikkat çekmektedir. Yöntemde, mikroskop camları insan plazması ile kaplanmıştır. Özellikle, implantların konak matriks proteinleri ile kaplı olmasından dolayı, implantlara uygulanabilecek antibiyofilm ajanların tespit edilmesinde tercih edilir. Plazma ile kaplı olan camlar üzerinde, kaplı olmayanlara göre daha fazla bakteri tutulumu gözlenmiştir [49].

3. Mikroskobi temelli testler

Mikroskobi temelli yöntemler, biyofilm matriksini, kompozisyonunu ve dağılımını incelemek açısından oldukça önemlidir. Mikroskobi ile biyofilm tabakasının heterojen yapısı ve organizasyonu direkt olarak incelenebilir. Farklı mikroskop türleri ile yapılan çalışmalar bulunmakla birlikte; ışık mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve lazer-ataçmanlı konfokal mikroskobu bu amaçla en sık kullanılan mikroskoplardır [50].

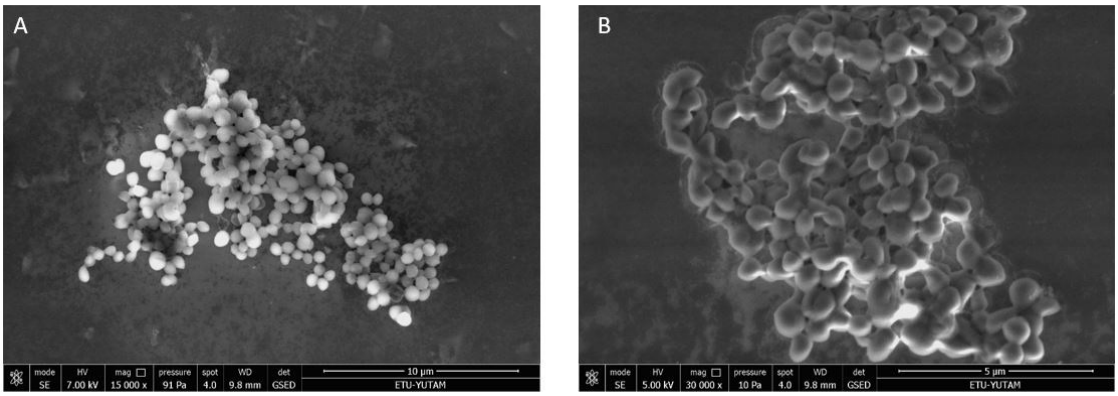
3.1. Faz kontrast mikroskobu

Işık mikroskobu çeşitlerinden olan ve canlı hücre incelenmesinde kullanılan faz kontrast mikroskobu, biyofilm inceleme çalışmalarında kullanılan ucuz ve basit bir araçtır. Yöntemde, genellikle cam veya polistren yüzeylerde biyofilm oluşumu gerçekleşen hücrelerin yıkanması yapılarak, inceleme yapılır. Ayrıca, KV, safranin gibi boyalarla da boyama yapılarak inceleme gerçekleştirilebilir. Ancak, diğer mikroskobi çeşitlerine göre daha zayıf bir gözlem yapılması nedeniyle fazla tercih edilmemektedir [50].

3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Mikrobiyal biyofilmlerin incelenmesinde, yüksek çözünürlüklü önemli bir tekniktir [51]. SEM'de biyofilm örnekleri fikse edilip, altın gibi çeşitli metal iyonları ile kaplanır ve yüksek vakum altında incelenir. Biyofilm morfolojisinin değişimlerini en aza indirmek için örnekler önce fiksasyon işlemine tabi tutulur [51-52].

Bunun yanında günümüzde bazı elektron mikroskoplarında altın gibi iletkenliği arttıran metal iyonlarıyla kaplama yapılmasına gerek olmadan biyofilm örneklerinin incelenmesi de yapılabilmektedir [53]. Şekil 5'de %5 glutaraldehit uygulaması ile fikse edilmiş *S. aureus* biyofilm örneklerinin farklı büyütmelerle alınmış SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5. SEM ile alınmış, *S. aureus* biyofilmlerine ait görüntüler. Görüntüler, SEM-Quanta FEG 250 cihazı E-SEM modülü ile alınmıştır.

3.3. Konfokal lazer taramalı mikroskobu

Konfokal lazer taramalı mikroskobu, biyofilm yapısını yüksek çözünürlükte üç boyutlu olarak görüntülenmesinde ve hidratlı canlı örneklerin gerçek zamanlı görselleştirilmesinde kullanılır [54]. Ayrıca bu yöntemde, biyofilmdeki canlılık durumu, hücre yoğunluğu, matriks bileşenleri ve antibiyotik penetrasyonu gibi parametreler analiz edilebilir. Ancak bu analizlerin doğru yapılabilmesi için uygun floresan boyaların seçimi kritik öneme sahiptir. Canlı/ölü boyama testlerinde kullanılan floresan özellikteki boyalardan SYTO 9 ve propidyum iyodür bu mikroskobi çeşidinde sıklıkla tercih edilir.

SYTO 9 boyası canlı hücreleri yeşil renkli boyarken, propidyum iyodür zar bütünlüğü bozulmuş ölü hücreleri kırmızı renkte göstermektedir. Bunlara ek olarak, glukoz/mannoz içeren polisakkaritleri concanavalin A–FITC ve β-1,3 ile β-1,4 glukanları boyayabilen calcofluor white da kullanılabilen boyalar arasındadır.

Biyofilmlerin üç boyutlu yapısı, hücrelerin iç içe geçmiş özelliği ve EPS bileşenlerindeki kompozisyon farklılıkları sebebiyle, sadece biyofilm tabakasını boyayabilen floresan işaretleyici bulunmamaktadır. EPS bileşenleri farklı boyalarla boyanarak incelemeye alınır. Konfokal mikroskobunda farklı boyalarla yapılan incelemeler dijital görüntü analizi ve matematiksel modellemeler ile kombinasyon halinde gerçekleştirilir [55].

3.4. Lazer yakalamalı mikrodiseksiyon mikroskobisi

Lazer yakalama mikrodiseksiyon mikroskobu biyofilmlerin farklı bölgelerindeki hücre alt kümelerini incelemek için kullanılır. Bu teknik sayesinde, biyofilm tabakasının farklı bölgeleri izole edilebilir ve bu bölgelere ait DNA, protein ve RNA izolasyonları yapılarak; gen ekspresyon farklılıkları incelenebilmektedir [56]. Biyofilm yapısının genomik, transkriptomik ve proteomik incelemeleri için vazgeçilmez teknikler arasındadır [57].

4. Moleküler temelli testler

4.1. Geleneksel polimeraz zincir reaksiyonu (PCR)

Geleneksel PCR yönteminde biyofilm ilişkili genlerin amplifikasyonu gerçekleştirilebilir. Ayrıca, adherens ve virülans özelliklere neden olan genlerin varlığı da belirlenir. PCR yöntemi için izolatlardan öncelikle DNA ekstraksiyonu gerçekleştirilir. Ardından, biyofilm ilişkili genlere ait primerler kullanılarak PCR yapılır. Örneğin, *S. aureus*'da sıklıkla fibrinojen bağlanma proteini (*Fib*), virülens genler (*clfA, clfB*) ve ica lokusunun (*ica ADBC* genleri) varlığı incelenir [58]. Klinikte henüz uygulaması bulunmamaktadır.

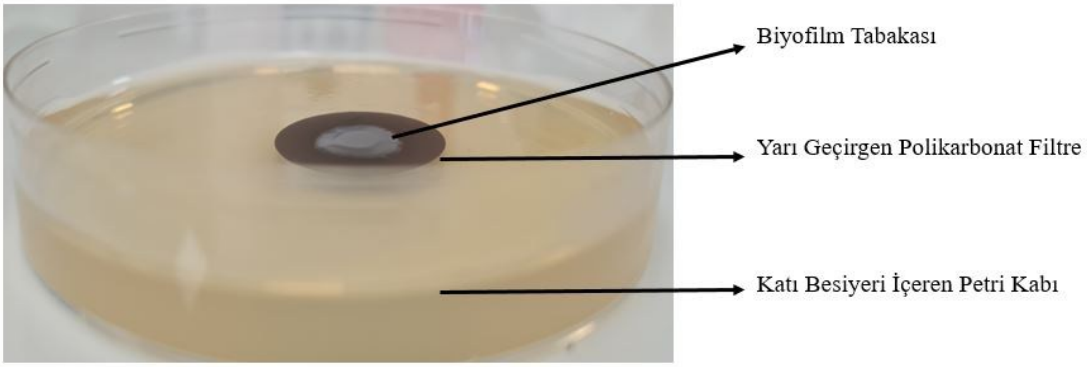
4.2. Gerçek zamanlı PCR

Gerçek zamanlı PCR (RT-PCR), biyofilm ilişkili genlerin sıklıkla incelendiği moleküler tekniklerden biridir. RT-PCR moleküler çalışmalarda oldukça hassas ve doğru sonuçlar veren bir sistemdir. Belirli antibiyofilm ajanların biyofilm ilişkili genlerin aktivitesini arttırdığı veya azalttığı RT-PCR ile eş zamanlı olarak belirlenebilir. Yöntemde gen ekspresyonunun azalışı veya artışını belirlemek için öncelikle total RNA izolasyonu ve cDNA sentezi basamakları uygulanır ve tasarlanan primerlerle gen ekspresyonu incelenir. Ayrıca, iki farklı tür içeren biyofilmlerin moleküler analizlerinde de kullanılabilir [59].
Lazer yakalama mikrodiseksiyon mikroskobundan elde edilen farklı biyofilm tabakalarına ait örneklerden alınan düşük miktardaki RNA'ların kullanıldığı gen ekspresyon çalışmaları, RT-PCR yönteminde gerçekleştirilir ve bu şekilde iki yöntem birleştirilerek biyofilmlerin farklı tabakalarının incelenmesi sağlanır [60].

4.3. Koloni biyofilm oluşumu yöntemi

Koloni temelli biyofilm testi, biyofilm yapısının ve içeriğinin incelenmesi ve test edilen antimikrobiyellerin hücreleri öldürme seviyesinin belirlenmesini sağlayan statik bir yöntemdir [61]. Yarı geçirgen bir membran uygun katı besiyeri üzerinde yerleştirilir ve membran üzerinde bakteri hücrelerinin geliştirilmesi sağlanır (Şekil 6). Membran üzerinde gelişen bakteriler belirli periyotlarda, yeni besiyeri üzerine kolaylıkla alınabilir. Bu yöntemde, hava-yüzey ara yüzünde oluşan biyofilm tabakası sıvı ortam olmadan

geliştirilir. Bu nedenle hücrelerin biyofilmden ayrılma, göç ve uzaklaşma yeteneği sınırlandırılmış olur [62].



Şekil 6. Koloni biyofilm testi petri görüntüsü. Siyah polikarbonat filtre üzerinde geliştirilen *Pseudomonas aeruginosa* (PAO1) biyofilmi.

Koloni biyofilm yöntemi ile antibiyotik dirençliliği ve biyofilm ilişkili dirençlilik mekanizmaları araştırılabilir. Örneğin, EPS bileşenlerinin analizi, protein sentezi ve gen ekspresyon değişimleri incelenebilir. Ayrıca, bu yöntemle birleştirilebilen mikroskobi teknikleri ile biyofilm tabakasındaki hücrelerin morfolojileri de incelenebilir. Glutaraldehit gibi fikse edici ajanlarla muamele edilen örnekler, biyofilm tabakasının bozulmadan incelendiği transmisyon elektron mikroskobu veya konfokal taramalı lazer mikroskopları ile analiz edilebilmektedir.

4.4. Kütle spektrometrisi

Kütle spektrometrisi, klinik çalışmalarda mikrobiyal hücrelerin cins, tür ve bazı durumlarda alt türlerin tanılanmasında geleneksel yöntemlere alternatif olarak kullanılabilmektedir. Günümüzde, klinik çalışmalarda, biyofilm üreticisi olan ve olmayan suşların ayrımında kongo kırmızısı agar ve kristal viole yöntemlerine alternatif olarak kullanılır [63]. Örneğin, Caputo ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, on sekiz *S. epidermidis* izolatının biyofilm oluşturup oluşturmadıkları matris destekli lazer desorpsiyon iyonizasyonu-uçuş zamanlı-kütle spektrometresi (MALDI-TOF MS) ile analiz edilmiştir. Protein profili farklılıklarına göre yapılabilecek bu yöntem, klinik izolatların elde edilmesinden sonra biyofilm oluşturma özelliklerinin incelenmesini sağlayabilecek hızlı ve güvenilir bir yöntem olarak literatüre girmiştir [63].

MALDI-TOF MS, biyofilm tabakasındaki bakterilerin tanılanmasında kullanılabildiği gibi, biyofilmlerin farklı aşamalarını belirlemede kullanılmaktadır [64-65]. Ancak, doğru bir sonuç için bakterilerin referans kütle spektrumlarını içeren kütüphanelere ihtiyaç duyulmaktadır.

4.5. Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi

Biyofilm yapısının biyokimyasal kompozisyonunun belirlenmesinde kullanılan analitik bir yöntemdir [66]. Attenuated Total Reflectance (ATR)-FTIR modülünün analiz derinliği oldukça küçüktür ve bu ölçü biyofilmlerin erken ve ileri aşamalarının biyokimyasal içeriğini, çevresel değişikliklere karşı meydana getirdiği değişimleri incelemek için kullanılır [67]. Çok hızlı, objektif ve ucuz bir yöntem olması avantajları

arasında sayılabilir. Mikroorganizma tanılamasında da kullanılmaya başlamış bir teknik olan FTIR spektroskopisi, biyofilm yapılarının nükleik asit, polisakkarit, protein ve lipitler bakımından yoğunluğunun ölçülmesi ile moleküler düzeyde biyofilmlerin parmak izlerini ortaya koyabilmektedir [68].

Kültüre bağımlı testlerin zorluğu sebebiyle, FTIR'ın biyofilm çalışmalarında EPS moleküllerinin içeriğinde meydana gelen değişimleri ve çeşitli antibiyotik uygulamalarında olası etki mekanizmalarının aydınlatılmasında kullanılması, bu yöntemi mikrobiyoloji alanında öne çıkarmaktadır [69].

5. Direkt biyofilm oluşumunun incelenmesi ve diğer statik testler

Biyofilmler, üç boyutlu yapı olduklarından dolayı izlenmeleri oldukça zordur. Sedki ve arkadaşlarının 2018 yılında önerdikleri statik bir yöntem olan mikrobiyal elektrokimyasal sistem (MES), biyofilmlerin izlenmesine olanak sağlamaktadır [70]. Yöntemin ana prensibi, mikroorganizma-elektron etkileşimidir. Biyofilm içerisinde gelişen mikroorganizmalar, metabolik aktiviteleri sonucunda ortama serbest elektron salarlar. Bu elektronlarda, sistemdeki elektron alıcısına transfer edilir ve sistemde üretilen elektrik akımı biyofilm içindeki canlı hücre sayısı ile orantılı olarak değişim göstermektedir. Bu sayede biyofilmler canlı olarak izlenebilmektedir.
Biyofilmlerin antibiyotik dirençliliğini belirleme amacıyla geliştirilmiş bir yöntem de Calgary biyofilm testidir [71]. Bu yöntem, otomasyon potansiyeli yüksek olan, modifiye edilmiş 96 kuyulu plaklarda, klinik olarak minimum inhibitör konsantrasyon (MİK) değerinin tedavi için yeterli bilgi sağlamadığı durumlarda biyofilme karşı antibiyotik aktivitesinin bir ölçütünü sunmaktadır [71].

5.1. Calgary biyofilm testi

Calgary biyofilm testi, bakterilerin biyofilm formundaki antibiyotik direncini belirlemek amacıyla geliştirilmiş, yüksek tekrarlanabilirliğe sahip, standart bir *in vitro* test sistemidir. Bu yöntem ilk olarak Ceri ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olup, biyofilm halindeki bakterilerin antibiyotiklere karşı duyarlılıklarını kantitatif olarak değerlendirmek için kullanılmaktadır [71, 72, 73].

Yöntemin uygulanmasında, polistiren çubuklar (peg) içeren özel bir kapak ile donatılmış 96 kuyulu plaklar kullanılmaktadır. İlk aşamada, her kuyuya hazırlanmış bakteri süspansiyonu inoküle edilir ve 24 saat süreyle 37 °C'de inkübasyona bırakılmaktadır. Bu inkübasyon süreci sonunda bakteriler, peg yüzeyine tutunarak biyofilm yapılarını oluşturmaktadır. Biyofilm oluşumunu takiben, pegler fosfat tamponu ile yıkanarak planktonik hücrelerden arındırılır ve farklı konsantrasyonlarda antimikrobiyal ajanlar içeren yeni bir plağa aktarılır.

Antibiyotik uygulamasının ardından, pegler yeniden fosfat tamponu ile yıkanarak, biyofilme bağlı hücreler sonikasyon yardımıyla süspansiyon haline getirilir. Bu süspansiyonlarda canlı hücre varlığı; CFU sayımı, optik dansite veya metabolik aktivite temelli XTT, resazurin gibi spektrofotometrik testlerle değerlendirilerek minimum biyofilm eliminasyon konsantrasyonu (MBEC) değeri hesaplanır. MBEC, biyofilm yapısındaki bakterilerin tamamen yok edilmesi için gereken en düşük antimikrobiyal ajan konsantrasyonunu ifade eder [71-72].

5.2.Biyofilm halka testi (Biofilm ring test)

Biyofilm halka testi, biyofilm oluşumunu kantitatif ve zaman içinde dinamik olarak izleyebilen, hızlı ve objektif bir *in vitro* test yöntemidir [73]. Bu yöntemde, manyetik mikropartiküller ve mikroplak tabanlı bir sistem kullanır. Yöntemde, bakteri süspansiyonu içerisine süspansiyon hâlindeki mikromanyetik boncuklar eklenir. Eğer bakteriler biyofilm oluşturmuyorsa, bu boncuklar mıknatısla plakanın ortasına çekilerek net ve homojen bir halka (ring) oluşturur. Ancak bakteriler yüzeye tutunup matriks üretmeye başlarsa, bu boncuklar biyofilme hapsolur ve hareket edemez hâle gelir; sonuç olarak halka oluşmaz veya düzensiz hale gelir [73, 74]. Bu yöntem birkaç saat içerisinde sonuç verdiğinden, boyama yöntemlerine göre avantajlıdır.

6. Sonuç

Biyofilmin moleküler yapısının aydınlatılması, enfeksiyonlarla ilişkisinin belirlenmesi ve antibiyofilm ajanların bulunması oldukça önemli bir çalışma alanıdır. Literatürde, biyofilm yapısının incelenmesinde ve antibiyofilm ajanların keşfedilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Biyofilm araştırmalarında kullanılan bu yöntemler tüm koşullara uygun olarak sonuç vermemektedir. Dolayısıyla, mikroorganizmalar için ideal, basit ve standartlaştırılmış bir yöntem bulunmamaktadır. Her yöntemin avantaj ve dezavantajları bulunduğundan, araştırmanın amacına uygun olarak kullanılacak parametreler belirlenmelidir.

Benzer şekilde, klinik mikrobiyolojide de biyofilm kaynaklı enfeksiyonların tespit edilmesinde standartlaştırılmış bir yöntem bulunmamaktadır. Mevcut testler, mikroorganizma kültürünün gelişmesi için birkaç gün gerektiğinden zaman alıcı, iş gücü ve deneyimli mikrobiyologlar gerektiren uygulamalardır. Ayrıca, bazı enfeksiyonlarda canlı ancak kültüre alınamayan (VBNC) özellikte mikroorganizmalar da bulunabileceğinden, kültüre bağlı boyama teknikleri uygun olmamaktadır. Bu nedenlerle, klinik, endüstriyel ve doğal ortamlarda oluşan biyofilm yapıları ile ilişkilendirilebilecek basit ve standartlaştırılmış biyofilm oluşumu yöntemleri geliştirmek için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Teşekkür

Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (YUTAM)'da bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yazıcı'ya teşekkürlerimizi sunarız. Diğer fotoğraflar, YUTAM, Moleküler Mikrobiyoloji laboratuvarında çekilmiştir.

Kaynaklar

[1] Harriott, MM., Biofilms and antibiotics, **Reference Module in Biomedical Sciences**, 1–11, (2019).

[2] Bisson, C., Lec P-H, Blique, M., Thilly, N., Machouart, M., Presence of trichomonads in subgingival biofilm of patients with periodontitis: preliminary results, **Parasitology Research**, v. 117, p. 3767–3774, (2018).

[3] Sauer, K., Stoodley, P., Goeres, DM., Hall-Stoodley, L., Burmølle, M., Stewart, PS., et al., The biofilm life cycle: expanding the conceptual model of biofilm formation, **Nature Reviews Microbiology**, v. 20, n. 10, p. 608–620, (2022).

[4] Querido, MM., Aguiar, L., Neves, P., Pereira, CC., Teixeira, JP., Self-disinfecting surfaces and infection control, **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 178, p. 8–21, 2019).

[5] Liu, H. Y., Prentice, E. L., & Webber, M. A., Mechanisms of antimicrobial resistance in biofilms. **npj Antimicrobials and Resistance**, v. 2, n. 1, p. 27, (2024).

[6] Zhao, A., Sun, J., Liu, Y., Understanding bacterial biofilms: From definition to treatment strategies. **Frontiers in cellular and infection microbiology**, v. 13, p. 1137947, (2023).

[7] Mah, T-FC., O'Toole, GA., Mechanisms of biofilm resistance to antimicrobial agents. **Trends in Microbiology**, v. 9, n. 1, p. 34–39, (2001).

[8] Mah, T-F., Pitts, B., Pellock, B., Walker, GC., Stewart, PS., O'Toole, GA., A genetic basis for Pseudomonas aeruginosa biofilm antibiotic resistance, **Nature**, v. 426, n. 6964, p. 306–310, (2003).

[9] Rajput, A., Bhamare, KT., Thakur, A., Kumar, M., Biofilm-i: a platform for predicting biofilm inhibitors using quantitative structure—relationship (QSAR) based regression models to curb antibiotic resistance, **Molecules**, v. 27, n. 15, p. 4861, (2022).

[10] Solano, C., Echeverz, M., Lasa, I., Biofilm dispersion and quorum sensing, **Current Opinion in Microbiology**, v. 18, p. 96–104, (2014).

[11] Michaelis, C., Grohmann, E., Horizontal gene transfer of antibiotic resistance genes in biofilms, **Antibiotics**, v. 12, n. 2, p. 328, (2023).

[12] Madsen, J. S., Burmølle, M., Hansen, L. H., & Sørensen, S. J., The interconnection between biofilm formation and horizontal gene transfer, **FEMS Immunology & Medical Microbiology**, v. 65, n. 2, p. 183–195, (2012).

[13] Thieme, L., Hartung, A., Tramm, K., Klinger-Strobel, M., Jandt, KD., Makarewicz, O., et al., MBEC versus MBIC: the lack of differentiation between biofilm reducing and inhibitory effects as a current problem in biofilm methodology, **Biological Procedures Online**, v. 21, p. 1–5, (2019).

[14] Peterson, SB., Irie, Y., Borlee, BR., Murakami, K., Harrison, JJ., Colvin, KM., et al., Different methods for culturing biofilms in vitro, **Biofilm İnfections**, p. 251–266, (2011).

[15] Rath, H., Stumpp, S. N., Stıesch, M., Development of a flow chamber system for the reproducible in vitro analysis of biofilm formation on implant materials, **PLoS One**, v. 12, n. 2, p. e0172095, (2017).

[16] Kwasny, S.M., Opperman, TJ., Static biofilm cultures of Gram-positive pathogens grown in a microtiter format used for anti-biofilm drug discovery, **Current Protocols in Pharmacology**, v. 50, n. 1, p. 13A–8, (2010).

[17] Waters, EM., McCarthy, H., Hogan, S., Zapotoczna, M., O'Neill, E., O'Gara, JP., Rapid quantitative and qualitative analysis of biofilm production by Staphylococcus epidermidis under static growth conditions, **Methods and Protocols**, p. 157–166, (2014).

[18] Kishen, A., Haapasalo, M., Biofilm models and methods of biofilm assessment, **Endodontic Topics**, v. 22, n. 1, p. 58–78, (2010).

[19] Mirani, ZA. et al., Ascorbic acid augments colony spreading by reducing biofilm formation of methicillin-resistant Staphylococcus aureus, **Iranian journal of basic medical sciences**, v. 21, n. 2, p. 175,(2018).

[20] Dutta, B., Nag, M., Lahiri, D., Ray, RR., Analysis of biofilm matrix by multiplex fluorescence in situ hybridization (M-FISH) and confocal laser scanning microscopy (CLSM) during nosocomial infections, **Analytical methodologies for biofilm research**, p. 183–203, (2021).

[21] Haney, E.F. et al., Critical assessment of methods to quantify biofilm growth and evaluate antibiofilm activity of host defence peptides, **Biomolecules**, v. 8, n. 2, p. 29, (2018).

[22] Gaudreau, AM., Labrie, J., Goetz, C., Dufour, S., Jacques, M., Evaluation of MALDI-TOF mass spectrometry for the identification of bacteria growing as biofilms, **Journal of microbiological methods**, v. 145, p. 79–81, (2018).

[23] Kaali, P., Momcilovic, D., Markström, A., Aune, R., Czel, G., Karlsson, S., Degradation of biomedical polydimethylsiloxanes during exposure to in vivo biofilm environment monitored by FE-SEM, ATR-FTIR, and MALDI-TOF MS, **Journal of Applied Polymer Science**, v. 115, n. 2, p. 802–810, (2010).

[24] Christensen, GD., et al., Adherence of coagulase-negative staphylococci to plastic tissue culture plates: a quantitative model for the adherence of staphylococci to medical devices, **Journal of Clinical Microbiology**, v. 22, n. 6, p. 996–1006, (1985).

[25] Wayne, PA., **Clinical and Laboratory Standards İnstitute**, Performance standards for antimicrobial susceptibility testing, (2011).

[26] Silva, NBS., Alves, PGV., de Andrade Marques, L., Silva, SF., de Oliveira Faria, G., de Araújo, LB., et al., Quantification of biofilm produced by clinical, environment and hands' isolates Klebsiella species using colorimetric and classical methods, **Journal of Microbiological Methods**, v. 185, p. 106231, (2021).

[27] Yang, Y., Jung, D., Bai D, Yoo G., Choi, J., Counterion-dye staining method for DNA in agarose gels using crystal violet and methyl orange, **Electrophoresis**, v. 22, n. 5, p. 855–859, (2001).

[28] O'toole, GA., Microtiter dish biofilm formation assay, **Journal of Visualized Experiments**, n. 47, p. e2437, (2011).

[29] Song, X., Xia, Y-X, He, Z-D., Zhang, H-J., A review of natural products with anti-biofilm activity, **Current Organic Chemistry**, v. 22, n. 8, p. 789–817, (2018).

[30] Lajhar, SA., Brownlıe, J., Barlow, R., Characterization of biofilm-forming capacity and resistance to sanitizers of a range of E. coli O26 pathotypes from clinical cases and cattle in Australia, **BMC microbiology**, v. 18, p. 1–15, (2018).

[31] Saxena, S., Banerjee, G., Garg, R., Singh, M., Comparative study of biofilm formation in Pseudomonas aeruginosa isolates from patients of lower respiratory tract infection, **Journal of clinical and diagnostic research: JCDR**, v. 8, n. 5, p. DC09, (2014).

[32] Nett, JE., Cain, MT., Crawford, K., Andes, DR., Optimizing a Candida biofilm microtiter plate model for measurement of antifungal susceptibility by tetrazolium salt assay, **Journal of clinical microbiology**, v. 49, n. 4, p. 1426–1433, (2011).

[33] Doğan, Ö., Ataç, N., Babuccu, G., Can, F., Comparison of Crystal Violet Staining Assay and XTT Methods in the evaluation of biofilm formation in Candida parapsilosis Candidemia Isolates, **Infectious diseases and clinical microbiology (Online)**, v. 3, n. 3, p. 158–163, (2021).

[34] Sumiyoshi, M., Miyazaki, T., Makau, JN., Mizuta, S., Tanaka, Y., Ishikawa, T., et al., Novel and potent antimicrobial effects of caspofungin on drug-resistant Candida and bacteria, **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 17745, (2020).

[35] Ou, F., McGoverin, C., Swift, S., Vanholsbeeck, F., Rapid and cost-effective evaluation of bacterial viability using fluorescence spectroscopy, **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 411, p. 3653–3663, (2019).

[36] Rosenberg, M., Azevedo, NF., Ivask, A., Propidium iodide staining underestimates viability of adherent bacterial cells, **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 6483, (2019).

[37] Freeman, DJ., Falkıner, FR., Keane, CT., New method for detecting slime production by coagulase negative staphylococci**, Journal of Clinical Pathology**, v. 42, n. 8, p. 872–874, (1989).

[38] Kaiser, TDL., Pereira, EM., Dos Santos, KRN., Maciel, ELN., Schuenck, RP., Nunes, APF., Modification of the Congo red agar method to detect biofilm production by Staphylococcus epidermidis, **Diagnostic Microbiology and İnfectious Disease**, v. 75, n. 3, p. 235–239, (2013).

[39] Panda, PS., Chaudhary, U., Dube, SK., Comparison of four different methods for detection of biofilm formation by uropathogens, **Indian Journal of Pathology and Microbiology**, v. 59, n. 2, p. 177–179, (2016).

[40] Hufnagel, D. A., Depas, W. H., & Chapman, M. R., The biology of the Escherichia coli extracellular Matrix, **Microbiology spectrum**, v. 3, n. 3, p. 10–1128, (2015).

[41] Dzionek, A., Dzik, J., Wojcieszyńska, D., Guzik, U., Fluorescein diacetate hydrolysis using the whole biofilm as a sensitive tool to evaluate the physiological state of immobilized bacterial cells, **Catalysts**, v. 8, n. 10, p. 434, (2018).

[42] Wu, Y. F., Lee, T. Y., Liao, W. T., Chuan, H. H., Cheng, N. C., Cheng, C. M., Rapid detection of biofilm with modified alcian blue staining: in-vitro protocol improvement and validation with clinical cases, **Wound Repair and Regeneration**, v. 28, n. 6, p. 834–843, (2020).

[43] Barbosa, I., Garcia, S., Barbier-Chassefière, V., Caruelle, J-P., Martelly, I., Papy-García, D., Improved and simple micro assay for sulfated glycosaminoglycans quantification in biological extracts and its use in skin and muscle tissue studies, **Glycobiology**, v. 13, n. 9, p. 647–653, (2003).

[44] Tote, K., Berghe, D Vanden., Maes, L., Cos, P., A new colorimetric microtitre model for the detection of Staphylococcus aureus biofilms, **Letters İn Applied Microbiology**, v. 46, n. 2, p. 249–254, (2008).

[45] Ommen, P., Zobek, N., Meyer, RL., Quantification of biofilm biomass by staining: Non-toxic safranin can replace the popular crystal violet. **Journal Of Microbiological Methods**, v. 141, p. 87–89, (2017).

[46] Knobloch, J. K. M., Horstkotte, M. A., Rohde, H., & Mack, D., Evaluation of different detection methods of biofilm formation in Staphylococcus aureus, **Medical microbiology and immunology**, v. 191, p. 101–106, (2002).

[47] Hassan, A., Usman, J., Kaleem, F., Omair, M., Khalid, A., & Iqbal, M., Evaluation of different detection methods of biofilm formation in the clinical isolates, **Brazilian journal of infectious diseases**, v. 15, p. 305–311, (2011).

[48] Crémet, L., Corvec, S., Batard, E., Auger, M., Lopez, I., Pagniez, et al., Comparison of three methods to study biofilm formation by clinical strains of Escherichia coli, **Diagnostic microbiology and infectious disease**, v. 75, n. 3, p. 252–255, (2013).

[49] Walker, JN., Horswıll, AR., A coverslip-based technique for evaluating Staphylococcus aureus biofilm formation on human plasma, Frontiers İn Cellular And İnfection Microbiology, v. 2, p. 39, (2012).

[50] Norton, TA., Thompson, RC., Pope, J., Veltkamp, CJ., Banks, B., Howard, C V., et al., Using confocal laser scanning microscopy, scanning electron microscopy and phase contrast light microscopy to examine marine biofilms, **Aquatic Microbial Ecology**, v. 16, n. 2, p. 199–204, (1998).

[51] Relucenti, M., Familiari, G., Donfrancesco, O., Taurino, M., Li X, Chen R., et al., Microscopy methods for biofilm imaging: focus on SEM and VP-SEM pros and cons, **Biology**, v. 10, n. 1, p. 51, (2021).

[52] Bossù, M., Selan, L., Artini, M., Relucenti, M., Familiari, G., Papa, R., et al., Characterization of Scardovia wiggsiae biofilm by original scanning electron microscopy protocol, **Microorganisms**, v. 8, n. 6, p. 807, (2020).

[53] Chandra, J., Mukherjee, PK., Ghannoum, MA., In vitro growth and analysis of Candida biofilms**, Nature Protocols**, v. 3, n. 12, p. 1909–1924, (2008).

[54] Lage, OM., Ramos, MC., Calisto, R., Almeida, E., Vasconcelos, V., Vicente, F., Current screening methodologies in drug discovery for selected human diseases, **Marine Drugs**, v. 16, n. 8, p. 279, (2018).

[55] Schlafer, S., Meyer, RL., Confocal microscopy imaging of the biofilm matrix, **Journal of microbiological methods**, v. 138, p. 50–59, (2017).

[56] Lenz, AP., Williamson, KS., Pitts, B., Stewart, PS., Franklin, MJ., Localized gene expression in Pseudomonas aeruginosa biofilms, **Applied and environmental microbiology**, v. 74, n. 14, p. 4463–4471, (2008).

[57] Pérez-Osorio, AC., Franklın, MJ., Isolation of RNA and DNA from biofilm samples obtained by laser capture microdissection microscopy, **Cold Spring Harbor Protocols**, v. 2008, n. 10, p. pdb-prot5065, (2008).

[58] Yazdani, R., Oshaghi, M., Havaei, A., Pishva, E., Salehi, R., Sadeghizadeh, M., et al., Detection of icaAD gene and biofilm formation in Staphylococcus aureus isolates from wound infections, **Iranian Journal of Public Health,** (2006).

[59] Magalhães, AP., França, Â., Pereira, MO., Cerca N., RNA-based qPCR as a tool to quantify and to characterize dual-species biofilms, **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 13639, (2019).

[60] Pérez-Osorıo, AC., Franklın, M.J., qRT-PCR of microbial biofilms, **Cold Spring Harbor Protocols**, v. 2008, n. 10, p. pdb-prot5066, (2008).

[61] Merrıtt, JH., Kadourı, DE., O'Toole, GA., Growing and analyzing static biofilms, **Current protocols in microbiology**, v. 22, n. 1, p. 1B – 1, (2011).

[62] Sung, K., et al., **Methods to grow and measure in vitro static biofilms**, (2022).

[63] Caputo, P., Di Martino, MC., Perfetto, B., Iovino, F., Donnarumma, G., Use of MALDI-TOF MS to discriminate between biofilm-producer and non-producer strains of Staphylococcus epidermidis, **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 8, p. 1695, (2019).

[64] Pereira, FDES., Bonatto, CC., Lopes, CAP., Pereira, AL., Silva, LP., Use of MALDI-TOF mass spectrometry to analyze the molecular profile of Pseudomonas aeruginosa biofilms grown on glass and plastic surfaces, **Microbial Pathogenesis**, v. 86, p. 32–37, (2015).

[65] Gaudreau, AM., Labrie, J., Goetz, C., Dufour, S., Jacques, M., Evaluation of MALDI-TOF mass spectrometry for the identification of bacteria growing as biofilms, **Journal of Microbiological Methods**, v. 145, p. 79–81, (2018).

[66] Schmıtt, J., Flemmıng, H.-C., FTIR-spectroscopy in microbial and material analysis, **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 41, n. 1, p. 1–11, (1998).

[67] Tugarova, AV., Scheludko, AV., Dyatlova, YA., Filip'echeva, YA., Kamnev, AA., FTIR spectroscopic study of biofilms formed by the rhizobacterium Azospirillum brasilense Sp245 and its mutant Azospirillum brasilense Sp245. 1610, **Journal of Molecular Structure**, v. 1140, p. 142–147, (2017).

[68] Quılès, F., Humbert, F., Delille, A., Analysis of changes in attenuated total reflection FTIR fingerprints of Pseudomonas fluorescens from planktonic state to nascent biofilm state. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 75, n. 2, p. 610–616, (2010).

[69] Chirman, D., Pleshko, N., Characterization of bacterial biofilm infections with Fourier transform infrared spectroscopy: A review**, Applied Spectroscopy Reviews**, v. 56, n. 8–10, p. 673–701, (2021).

[70] Sedki, M., Hassan, RYA., Andreescu, S., El-Sherbiny, IM., Online-monitoring of biofilm formation using nanostructured electrode surfaces. **Materials Science and Engineering:** C, v. 100, p. 178–185, (2019).

[71] Ceri, H., Olson, ME., Stremick, C., Read, RR., Morck, D., Buret, A., The Calgary Biofilm Device: new technology for rapid determination of antibiotic susceptibilities of bacterial biofilms, **Journal Of Clinical Microbiology**, v. 37, n. 6, p. 1771–1776, (1999).

[72] Reiferth, V. M., Holtmann, D., Müller, D., Flexible biofilm monitoring device, **Wiley Online Library**,v.22, n.12, p. 796-802, (2022).

[73] Di Domenico, E. G., Toma, L., Provot, C., Ascenzioni, F., Sperduti, I., Prignano, G., et al., Development of an in vitro assay, based on the biofilm ring test®, for rapid profiling of biofilm-growing bacteria, **Frontiers in Microbiology**, v. 7, p. 1429, (2016).

[74] Olivares, E., Badel-Berchoux, S., Provot, C., Jaulhac, B., Prévost, G., Bernardi, T., & Jehl, F .,The BioFilm Ring Test: a rapid method for routine analysis of Pseudomonas aeruginosa biofilm formation kinetics, **Journal Of Clinical Microbiology**, v. 54, n. 3, p. 657–661, (2016).

DOI:10.25092/baunfbed. 1657973 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 780-801, (2025)*

Mimari tasarımda kullanıcı-tasarımcı iş birliğine dayalı bir yaklaşım: Bilim ve sanat merkezleri örneği

Sümeyye Aybike TÜRK[1*], Reyhan MİDİLLİ SARI[2]

[1]Balıkesir Üniversitesi Mim. Fak. Mim. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir.
[2]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mim. Fak., Mim Böl., Kanuni kampüsü, Trabzon.

Geliş Tarihi (Received Date): 14.03.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.06.2025

Öz

Mimari tasarımda katılım; tasarımcının bilgi, birikim ve tecrübesini yok saymadan, kullanıcıların mekân deneyimlerinden yola çıkarak sorunlarını ve ihtiyaçlarını tanımladıkları, tasarımcının kullanıcı iş birliği ile tasarım eylemine rehberlik ettiği demokratik ve hümanist bir tasarım sürecini kapsamaktadır. Bu yaklaşımda hedef, bireyleri planlama ve tasarım kararları alma sürecine dahil ederek onlara söz hakkı tanımak, bilgi alışverişini güçlendirmek ve sorunlara kullanıcıyı da dahil ederek çözüm aramaktır.

Bu çalışma; Bilim ve Sanat Merkezi (BİLSEM) kullanıcılarının söz konusu merkezlere ilişkin istek, ihtiyaç ve beklentilerini rahatlıkla ifade etmelerini sağlayan, tasarımcı-kullanıcı etkileşimine dayalı bir "atölye çalışmasını" konu edinmektedir. Kullanıcıların tasarımcı vasıtasıyla mekân farkındalıklarını arttırmak, çevrelerine ve eğitim kurumlarına bakış açılarını ve iç görülerini genişleterek imgelenen bir BİLSEM tanımı yaratmak hedeflenmiştir. "Atölye çalışması"; tasarımcının kullanıcıya sağladığı çeşitli araç ve yöntemlerle, kullanıcının istek ve beklentilerini kendi içerisinde sistematikleştiren, bu istek ve beklentileri tasarımcı tarafından kolay anlaşılır, yorumlanabilir ve çözüm üretilebilir kılan bir süreci içermektedir. Bu doğrultuda Trabzon Bilim ve Sanat Merkezi'ne kayıtlı toplam 17 öğrenci çalışmanın örneklem grubunu oluşturmuştur. Çalışma sonunda elde edilen veriler içerik analizi yöntemi ile temalara ayrılarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda katılımcılar günlük yaşam deneyimleri vasıtasıyla istek ve ihtiyaçlarını belirtmiş, tasarımcı ise uzmanlık alanı dahilinde bu istek ve ihtiyaçlara çözüm önerileri getirmiştir. Çalışmada, kullanıcı-tasarımcı iş birliğinden doğan bir BİLSEM imgesi oluşturulmuştur.

[*]Sümeyye Aybike TÜRK, aybike.turk@balikesir.edu.tr, http://orcid.org/0000-0003-4839-1867
Reyhan MİDİLLİ SARI, remidilli@ktu.edu.tr, http://orcid.org/0000-0002-9069-5656

** *Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde ve Prof. Dr. Reyhan MİDİLLİ SARI danışmanlığında tamamlanan "Bilim Sanat Merkezlerinin Katılımcı Yaklaşımla Değerlendirilmesi ve Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.*

Anahtar kelimeler: *Kullanıcı katılımı, bilim ve sanat merkezleri, üstün yetenekli birey, eğitim yapıları*

An approach based on user-designer collaboration in architectural design: The example of science and art centers

Abstract

Participation in architectural design covers the democratic and humanist design process in which users define their problems and needs based on their space experiences, without ignoring the knowledge experience of the designer, and the designer guides the design action with the user. The aim in this approach is to include individuals in the planning and design decision-making process, to give them a say, to strengthen the exchange of information, and to seek solutions to problems by including the user.

This study is about a "workshop" based on designer-user interaction that allows the users of the Science and Art Center (BİLSEM) to easily express their requests, needs, and expectations regarding the centers in question. It is aimed to increase the users' spatial awareness through the designer, to create an imagined BİLSEM definition by expanding their perspectives and insights into their surroundings and educational institutions. The "workshop" includes a process that systematizes the user's requests and expectations within itself, and makes these requests and expectations easily understandable, interpretable and solution-producible by the designer, with various tools and methods provided by the designer to the user. In this context, a total of 17 students registered at the Trabzon Science and Art Center constituted the sample group of the study. The data obtained at the end of the study were analyzed by dividing them into themes using the content analysis method. As a result of the study, the participants expressed their wishes and needs through their daily life experiences. The designer offered solutions to these wishes and needs within his/her area of expertise. In the study, a BİLSEM image was created, resulting from user-designer collaboration.

Keywords: *User participation, science and art centers, gifted students, educational building*

1. Giriş

Tasarımda kullanıcı katılımı kullanıcının tasarım sürecinde işbirlikçi rolde yer alarak tercihlerinin belirlendiği, uzman kişinin ise kullanıcı ile doğrudan ilişki kurarak kendinden sonraki tasarımlarda kullanılacak veriler elde ettiği, kullanıcı-mekân uyumluluğu doğuran bir fikre işaret etmektedir. Bireysel farklılıklardan doğan ihtiyaçların daha görünür hale geldiği günümüz dünyasında kullanıcının tasarım sürecine dahil edilmesi oldukça demokratik ve hümanist bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir.

Geleneksel tasarım anlayışında gözlem yapma, analiz etme ve karar verme mekânizmalarının tümü uzman kişi niteliğindeki mimar üzerinde toplanmaktadır. Mimar, teknik bilgi birikimi ile donanımlı olmasına rağmen kimi zaman kullanıcının istek, ihtiyaç ve beklentilerini karşılayan mekânlar üretme konusunda yetersiz

kalmaktadır. Lefebvre [1], tasarlanan mekân ile deneyimlenen mekân arasındaki çatışmaya işaret ederek, mimarın ortaya koyduğu soyut mekânın, kullanıcının deneyimlediği somut mekân ile uyuşmazlığından doğan zorunlu mekân değişimlerine/dönüşümlerine işaret eder. Boudon [2] ise tasarım ve kullanım arasında oluşan çelişkili durumun kullanıcının süreç içerisinde fiziksel bir veriden öteye gidememesinden kaynaklandığını belirtmiştir. Mekân, yalnızca tasarlanan bir öğe olmaktan ziyade içerisinde yaşanan ve yaşayan kişinin yaşamıyla bütünleşen dinamik bir mekânizma olarak ele alınmalıdır. Mekânı fiziksel olarak üreten kişi ile yaşayan kişi arasındaki güçlü ilişki ve etkileşim ise mekânın etkinliği ve işlevselliği üzerinde olumlu etkiler yaratabilmektedir. Sanoff [3], kullanıcı katılımının sağlandığı projelerdeki başarıyı kullanıcıların gündelik yaşam deneyimleri ve çevrelerindeki gerçekliğe karşı farkındalık düzeylerinin mimar ve diğer meslek gruplarından daha fazla oluşunda saklı olması ile ilişkilendirmiştir. Ayrıca katılımcı yaklaşımlarda mimar ve kullanıcının farklı uzmanlık alanlarına sahip olduğunu belirterek, kullanıcının problemi tanımlamada, mimarın ise problemi çözme konusunda uzman olduğunu belirterek katılımcı tasarım süreçlerinde tüm katılımcıların kendi uzmanlık alanlarını paylaşmaları ile başarılı sonuçların elde edilmesinin mümkün olacağını vurgulamıştır. Lee [4] ise tasarlanan ve yaşanan olarak tariflenebilen mekân diyalektiğine katılım kavramını dahil ederek Lefebvre'nin soyut-somut mekân konseptinin kesişimini "iş birliği alanı" olarak tanımlamıştır.

Hacıalibeyoğlu [5], tasarımın doğası gereği bireysel bir etkinlik olduğu kabulünden yola çıksa da tasarlama eyleminin çok paydaşlı bir üretim süreci olduğunun bilinci ile birlikte bu ikircikli durumun derinlemesine düşünülmesi ve tartışılması gerektiğini savunmuştur. Bu nedenle mimarlıkta kullanıcı katılımı sorununa iki farklı yanıt vermiştir. Bu yanıtlardan birincisi, tasarımcının uzman kişi olduğu varsayımı ile geleneksel tasarım tavrını ve yaratıcı sürecin tek aktörünün mimar olduğu görüşünü savunarak mevcut yapıyı korumak; ikincisi ise mimarın bilgi ve deneyim kontrolünü kaybetmesine izin vermeden kullanıcının tasarım sürecine dahil edilmesini sağlayarak yeni bir yöntem ve bakış açısı önermektir. Atölye çalışmasını bir araç olarak kullanan bu çalışmada Boudon [2]'un ifade ettiği tasarım ve kullanım arasındaki çelişkili durumuna Hacıalibeyoğlu [5]'nun ikinci yanıtı ve Sanoff [3] katılımcı yaklaşım fikirlerinden yola çıkılarak bir eğitim yapısı özelinde tasarımcı ve kullanıcı iş birliğine dayalı bir yöntem denenerek yanıt aranmıştır.

Katılımın amacı bireylerin yeni öğrenme ortamlarını araştırmaları ve keşfetmeleri için olanakların farkına varmalarını sağlamaktır. Bu süreç; açık, net, iletişimsel olduğu ve diyalogu, tartışmayı ve iş birliğini desteklediği sürece başarıya ulaşabilmektedir. Lackney [6] "öğrenme ortamları için 32 tasarım kriteri" isimli çalışmasının ilk kriterini okul tasarımı ve planlamasında iş birliğini en üst düzeye çıkarmak olarak tanımlamış ve bu maddeyi eğitim yapılarının tasarımını geniş bir kullanıcı perspektifiyle ele almak gerektiğinden söz etmiştir.

Tasarımda katılımcı yaklaşımlar kullanıcıların neye ihtiyaç duyduklarını tasarımcıya doğrudan iletebildikleri, tasarımcının ise kullanıcıyı dinleme ve günlük yaşam rutinleri hakkında daha güçlü bilgi edinmesini olanaklı hale getiren süreçlerdir. Bu süreç içerisinde kullanıcı ve tasarımcının aynı dili konuşması, sağlıklı iletişim ve müzakere ortamının kurulması amacıyla birtakım yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bireyleri işbirlikçi çalışmalar için bir araya getiren katılımcı atölyeler, okul tasarımına yeni bir yaklaşım getirmenin en verimli yolu olarak görülmektedir. Planlanmış etkinlikler olan bu atölye çalışmalarında iki veya üç boyutlu anlatım teknikleri kullanılmakta, kullanıcının tasarıyı anlaması, değerlendirmesi, yorumlaması ve ihtiyaçlarına uygun

öneriler sunması sağlanmaktadır [5]. Katılımcı yaklaşım araştırmalarında başka iletişim yöntemlerinden yararlanıldığını da görmek mümkündür. Örneğin Clark [7] nitel ve nicel araştırma yöntemlerini bir arada kullandığı ve "Mozaik Yaklaşımı" adını verdiği bir çoklu-yöntem denemesi ile eğitim yapılarının bireylerin kapasitelerine ve ihtiyaçlarına uygunluğunu katılımcı bir yaklaşımla sorgulamıştır. Clark [7]'ın yaklaşımında gözlem, görüşme, fotoğraf çekme, kitapçık oluşturma, yakın çevre turları, haritalama ve bireysel görüşmelerden oluşan çok çeşitli yöntemlerin bir arada denenmesi sağlanmıştır.

Bu çalışma; üstün yetenekli çocukların eğitim aldığı bir kurum olan Bilim ve Sanat Merkezleri'nin (BİLSEM) kullanıcı ve tasarımcı iş birliğine dayalı katılımcı bir yaklaşım denemesi ile ele alınmasını içermektedir. Bilim ve Sanat Merkezleri 1995 yılında kurulan, belirli bir yetenek alanında üstün performans gösterdiği uzman kişiler tarafından belirlenmiş özel yetenekli bireylerin, örgün eğitim saatleri dışında, ilgi ve yetenekleri doğrultusunda destek eğitimi almaları için kurulmuş eğitim kurumlarıdır [8,9]. Burada eğitim alan öğrenciler sırası ile; uyum programı, destek eğitimi, bireysel yetenekleri fark ettirme programı, özel yetenekleri geliştirme programı ve proje üretimi olmak üzere beş eğitim programına tabii tutularak hem kendilerini keşfetmekte hem de bilimsel bir çalışmanın nasıl yürütüleceği hakkında bilgi sahibi olmaktadırlar [9]. Gökdere ve Küçük [10] ile Sarı [11] yaptıkları çalışmalarda üstün yetenekli öğrencilerin geleneksel eğitim ortamlarında yer alan programlardan daha farklı öğrenme ihtiyaçları bulunduğunu, bu sebeple öğrencilerin becerilerini geliştirebilmeleri amacıyla kendilerine farklı tecrübeler sunacak ortamların ve öğrenme eyleminin niteliğini ve kalitesini arttıracak fırsatların sunulması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda çalışmada; söz konusu kurumlardaki öğrencilerin kurumlara ilişkin istek ve ihtiyaçlarını katılımcı bir yaklaşımla ortaya koymak ve tasarımcının kullanıcılardan elde edilen verileri uzmanlığı aracılığıyla yorumlayarak bir BİLSEM imge ve imajı oluşturmak amaçlanmıştır. Çalışma; atölye sürecinin uzamaması, ilginin dağılmaması, BİLSEM'e ilişkin nitelikli ve derinlemesine görüşlere ulaşılabilmesi amacıyla konum, imaj, eylem-mekân başlıkları ile sınırlandırılmıştır.

Çalışma; sayısı son yıllarda hızla artan ve çoğunlukla bir eğitim yapısı olmayan binalarda faaliyet gösteren BİLSEM binalarını, kullanıcı-tasarımcı iş birliğine dayalı bir yöntem deneyerek, mekânın en etkin kullanıcısı durumunda olan öğrencilerin görüşleri ile irdelemesi hem tasarım disiplinleri hem de eğitim bilimlerine yapacağı katkı açısından değerlidir. Çalışma sonucunda elde edilen BİLSEM imgesi ise kullanıcının deneyim, istek ve beklentilerini, tasarımcının ise bilgi, birikim ve uzmanlığını içermektedir.

2. Materyal

Çalışma alanını Trabzon Faruk Başaran Bilim ve Sanat Merkezi oluşturmaktadır. Trabzon Faruk Başaran Bilim Sanat Merkezi Trabzon'un merkez ilçesi Ortahisar'a bağlıdır ve kentsel dönüşüm çalışmalarının devam ettiği Esentepe Mahallesi'nde yer almaktadır. Yapı 2010 yılında inşa edilmiş, zemin+2 kattan oluşan betonarme bir yapıdır. Yapıya, Trabzon kent meydanından yaya olarak veya toplu taşıma ile ulaşım sağlanabilmektedir (Şekil 1).

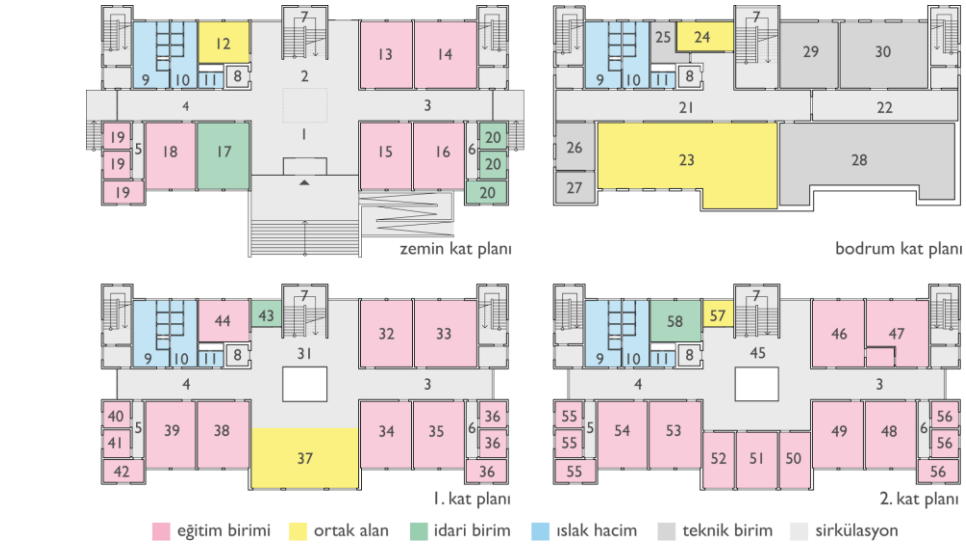
Yapının cephe karakteri incelendiğinde geniş sayılabilecek saçağı, kolon-pencere ritmi, iki yönde ve ortada dışarı taşırılarak oluşturulmuş ince uzun dikdörtgen kesitli kütleleri ve simetrik kurgusu ile yapının I. Ulusal Mimarlık Akımı'ndan izler taşıdığı anlaşılmaktadır. Yapı mevcut görünüşü ile geleneksel bir eğitim tesisinden farklı

gözükmemekte, bina cephesi özel yetenekli çocuklara eğitim verilen bir eğitim ve araştırma merkezi olduğuna dair herhangi bir ipucu barındırmamaktadır (Şekil 1).

Şekil 1. Trabzon Bilim ve Sanat Merkezi

BİLSEM binasının bahçesi incelendiğinde ise bahçenin otopark olarak kullanıldığı, yapının hem ön hem de arka bahçesinde oturma/dinlenme, spor yapma, oyun oynama, araştırma/gözlem yapma gibi eylemlere olanak veren düzenlemelerin olmadığı, bahçede neredeyse hiç, yeşil alan bulunmadığı ve bahçe zemin kaplaması olarak beton parke taşı kullanıldığı dikkat çekmektedir (Şekil 1).

Mevcut yapının iç mekanları irdelendiğinde; zemin katında yer alan birimlerin hiçbirinin bahçe ile doğrudan ilişki kurmadığı görülmektedir. Yapıda bulunan eğitim ortamları geleneksel dikdörtgen formdadır ve yaklaşık aynı genişliğe sahiptir. Mekanlar genişletilmeye veya daraltılmaya uygun esneklikte tasarlanmamıştır. Yapının ortak alanlar incelendiğinde ise koridorların oturma, dinlenme, bireysel veya grup halinde çalışma gibi farklı eylemlere olanak vermediği dikkat çekmektedir (Şekil 2).

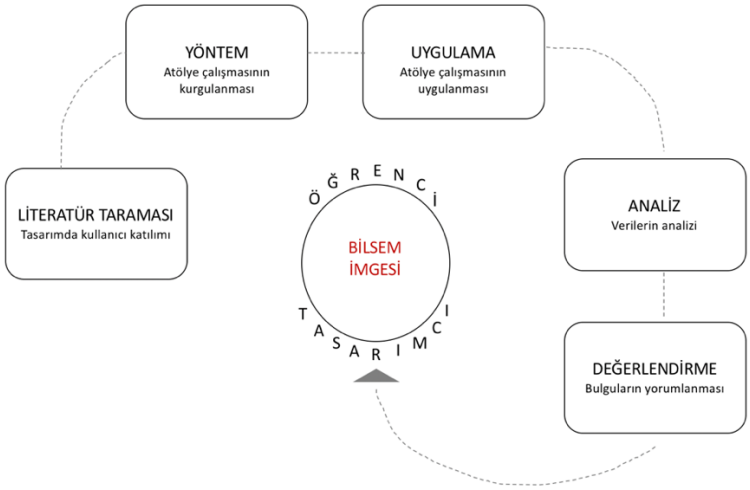


1: giriş
2: koridor-I
3: koridor-II
4: koridor-III
5: koridor-IV
6: koridor-V
7: merdiven
8: asansör
9: kadın wc
10: erkek wc
11: engelli wc
12: kantin
13: biyoloji-I sınıfı
14: kimya-I sınıfı
15: biyoloji-II sınıfı
16: fen bilimleri sınıfı
17: müdür odası
18: türkçe-II sınıfı
19: türkçe-bireysel çalışma odası
20: rehberlik odası
21: koridor-VI
22: koridor-VII
23: çok amaçlı salon
24: mescit
25: teknik birim
26: hizmetli odası
27: arşiv
28: atölye
29: depo
30: su deposu
31: koridor-VIII
32: dil bilimleri sınıfı
33: fen bilimleri sınıfı
34: yazılım kodlama-turkcell sınıfı
35: lise-matematik sınıfı
36: bireysel çalışma odası
37: sergi alanı
38: robotik atölye
39: teknoloji tasarım sınıfı
40: tarih sınıfı
41: coğrafya sınıfı
42: bireysel çalışma odası
43: müdür yardımcısı odası
44: eğlenceli bilim sınıfı
45: koridor-IX
46: fizik-I sınıfı
47: fizik-II sınıfı
48: yapay zeka sınıfı
49: resim sınıfı
50: felsefe sınıfı
51: sosyal bilimler sınıfı
52: matematik sınıfı
53: ingilizce sınıfı
54: müzik sınıfı
55: müzik-bireysel çalışma odası
56: resim-bireysel çalışma odası
57: kulüp odası
58: öğretmenler odası

Şekil 2. Trabzon Bilim ve Sanat Merkezi kat planları

3. Çalışmanın yöntemi

Katılım anlayışı kapsamında kullanıcıların kendi görüşlerini, deneyimlerini ve yaşamlarını etkileyen ve ilgilendiren her konuda fikir beyan edebilmeleri beklenmektedir. Bu çalışmada; BİLSEM öğrencilerinin hayallerindeki BİLSEM mekânlarına ilişkin istek ve beklentilerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu hedefle BİLSEM öğrencileri ile odak grup görüşmelerinden oluşan ve çoklu yöntem içeren bir atölye çalışması kurgulanmıştır. Atölye çalışması içeriğinde sunum, grup etkileşimi, fikir alışverişi ve görüşme formu gibi sözlü ve yazılı iletişim kaynaklarını barındırmaktadır. Kurgulanan atölye çalışması; konum, imaj ve eylem-mekân başlıklarını içeren aşamalardan oluşup, her bir başlık altında katılımcılara farkındalık kazandırmayı hedefleyen sunum, farklı düşüncelerin tartışıldığı fikir alışverişi ve son olarak kullanıcıların kendi istek ve ihtiyaçlarını dile getirerek BİLSEM imgesi oluşturmalarının amaçlandığı bir görüşme formunu doldurma aşamalarından oluşmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışmanın strüktürü

Holmes [12] araştırmalarda kullanılacak görüşme türlerini "yapılandırılmış", "yarı-yapılandırılmış" ve "yapılandırılmamış" olmak üzere üçe ayırmıştır. Bu çalışmanın kurgulanmasında faydalanılan yarı yapılandırılmış görüşme formlarında; araştırmacı önceden hazırlanan fakat kesin belirlenmiş sınırlara sahip olmayan bir formatta oluşturulmuş araştırma sorularına esnek, değişebilen sırada ve farklı ifadeler kullanarak yanıt aramaktadır. BİLSEM öğrencilerinin istek ve ihtiyaçlarının belirlenmesi kapsamında yarı-yapılandırılmış görüşme formlarından yararlanılmış ve birtakım sorulara yanıt aranmıştır. Bu sorular mimari tasarım sürecinin ilk adımı olan ve yerleşim kararlarını içeren ilgili konum/yer, kullanıcıların yapı hakkındaki ilk izlenimlerinin edinildiği imaj/görünüş ve yapı programlama ile ilişkili mekân örgütlenmesini ve davranışsal hedefleri belirlemeye yönelik sorulardan oluşmaktadır. Bu bağlamda çalışmada aşağıdaki sorulara yanıt aranmıştır:

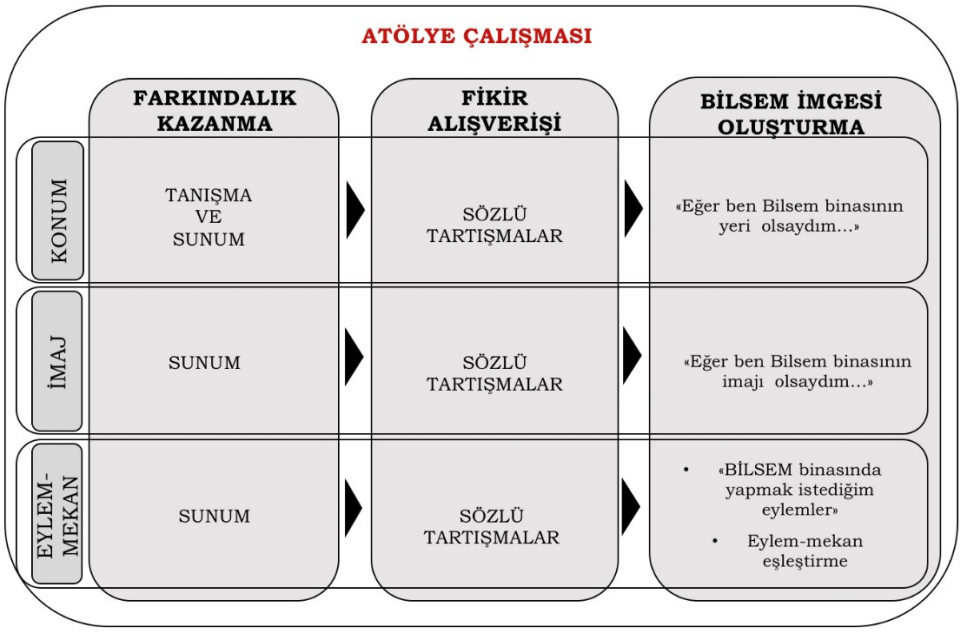
- BİLSEM nasıl bir yerde olmalı?
- BİLSEM nasıl görünmeli?
- BİLSEM'de hangi eylemler/ etkinlikler yapılmak istenir?
- BİLSEM'de yapılmak/gerçekleştirilmek istenen eylemler için hangi mekânlar ya da mekân parçaları istenir?

3.1. Çalışma Grubu

Çalışma grubu verilere kolaylıkla ulaşabilmek, katılımcılarla rahatlıkla ve sıklıkla görüşme sağlayabilmek adına ilgili kent merkezindeki Trabzon Bilim ve Sanat Merkezi'ne kayıtlı öğrencilerden oluşturulmuştur. Çalışmada tek bir BİLSEM'in çalışma alanını oluşturması ise aynı mekânı deneyimleyen kullanıcıların mekâna ilişkin ortak problemlerini, eksiklikleri ve ihtiyaçları belirleyebilmelerini sağlamak açısından alınmış bilinçli bir karardır. Atölye çalışmasının örneklem grubunun oluşturulmasında bir bireyin yardımıyla diğer bireylere ulaşıp zincirleme olarak örneklem grubunun oluşmasını sağlayan kartopu örneklemden yararlanılmıştır. Çalışmaya katılmayı kabul eden katılımcılar ile birlikte odak grup görüşmelerinden oluşan bir atölye süreci planlanmıştır. Odak grup görüşmeleri önceden planlanmış bir konu hakkında, yine önceden belirlenmiş bir grup katılımcının düşüncelerini öğrenmek için planlanmış bir tartışmalar serisi olarak tanımlanabilir. Odak grup çalışması, araştırılan konuyla ilgili ortak deneyim, görüş ve beklentilere sahip kişiler arasından seçilen temsili bir grupla yürütülür. Bu grup genellikle 8 kişiyi geçmeyecek şekilde planlanmaktadır [13]. Çalışmaya katılmaya gönüllü olan katılımcılardan, başka gönüllü katılımcıların bulunmasının istendiği kartopu örnekleme göre; bireysel yetenekleri fark ettirme (BYF) programı 4. ve 5. sınıf düzeyinden 5, özel yetenekleri geliştirme (ÖYG) programı 5-6-7 ve 8. sınıf düzeylerinden 6 ve proje üretimi (PÜ) programı 9-10 ve 11. sınıf düzeylerinden 6 olmak üzere toplam 17 öğrencinin çalışmaya katılması sağlanmıştır. BİLSEM eğitim programının ilk aşamalarını oluşturan uyum ve destek eğitim programında yer alan öğrenciler, yaşları dolayısıyla mekân farkındalıklarının düşük olacağı düşüncesi ve BİLSEM mekânlarını deneyimleme sürelerinin daha kısa olması sebebiyle çalışmaya dahil edilmemiştir.

3.2. Verilerin Toplanması ve Analizi

Atölye çalışması BYF, ÖYG ve PÜ grubu öğrencilerinin bulunduğu üç grup için ayrı günlerde uygulanmış fakat atölye programı tüm gruplar için aynı içerikte kurgulanmıştır. Buna ek olarak katılımcılarla yapılan tartışmaların yaş düzeylerine göre anlaşılabilir biçimde olmasına dikkat edilmiştir. Atölye çalışması sırası ile; farkındalık kazanma, fikir alışverişinde bulunma ve BİLSEM imgesi oluşturma amacı güden ve konum, imaj ve eylem-mekân başlıklarından oluşan üç oturum şeklinde kurgulanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Atölye çalışmasının içeriği ve aşamaları

Çalışmanın ilk bölümünde katılımcıların araştırmacıyı ve birbirlerini tanımaları sağlanmış, atölye çalışmasının amacının ve içeriğinin anlaşılması hedeflenmiştir (Şekil 5).

Şekil 5. Tanışma, atölye çalışmasını tanıtma ve sunuda gösterilen görseller

Ardından katılımcıların farkındalıklarını arttırmak, bakış açılarını zenginleştirmek ve farklı örnekler üzerinden hayal edebilmelerini sağlamak amacıyla; içerisinde basılı kaynaklardan ve/veya dijital platformlardan ulaşılarak derlenen ulusal ve uluslararası ölçekte katılımcıların hayal gücünü arttıracağı düşünülen eğitim yapılarından örnekler barındıran sunu paylaşılmıştır. Söz konusu sunu; konum, imaj ve eylem-mekân başlıklarından oluşmaktadır. Tüm bu başlıklar altında nitelikli eğitim yapılarının konumlandıkları yerler, çevresel veriler, imaj, kullanılan malzemeler, kat yükseklikleri, renk ve doku kullanımları, saydamlık, esneklik gibi detaylarına değinilmiştir. Her bir sununun ardından katılımcılar, konu ile ilgili görüşlerini paylaşmışlar, beğendikleri ve beğenmedikleri noktaları ifade etmişlerdir. Konum ile ilgili tartışmaların ardından üzerinde "Eğer ben bir BİLSEM binasının yeri olsaydım..." başlıklı görüşme formları dağıtılmış ve katılımcılardan yarım bırakılan bu cümleyi istedikleri gibi tamamlamaları beklenmiştir. Katılımcılar birden fazla cümle kurma konusunda teşvik edilmiştir. Atölyenin imaj başlığı altında da aynı aşamalar uygulanmış yalnızca BİLSEM imgesi oluşturma aşamasında bu sefer katılımcıların; "Eğer ben bir BİLSEM binasının imajı olsaydım..." başlıklı görüşme formunu doldurmaları istenmiştir. Sunuya içeriğinde; ulusal ve uluslararası eğitim yapısı örneklerinden çeşitli görsellerin bulunduğu "eylem-mekân" başlıklı aşama ile devam edilmiştir. Bu bölümdeki görsellerde; sınıflara, atölyelere, koridorlara, donatılara ve işlevselliğe vurgu yapılmıştır. Bu sununun ardından katılımcılara "eylem-mekân" başlıklı formlar dağıtılmıştır. Katılımcılar ellerindeki formun sol sütununa BİLSEM'de yapmak istedikleri eylemleri yazmışlar ve bu eylemleri sağ sütunda yer alan mekân veya mekân parçaları isimleriyle eşleştirmişlerdir.

Görüşmeler sırasında katılımcıların farklı fikirler beyan etmelerine izin verilmiş, sorulan soruların cevabının nasıl olması gerektiği yönünde katılımcıyı etkilememeye dikkat edilmiştir. Katılımcılar fikirlerini rahatlıkla ve özgürce beyan edebilmeleri hususunda teşvik edilmişlerdir. Tartışmalar bittikten sonra ilgili formlar toplanmış ve içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Toplanan veriler yazarlar tarafından önce kavramsallaştırılmış, daha sonra ortaya çıkan kavramlara göre organize edilerek ilgili temalara ayrılmıştır. Elde edilen temalar vurgu sayılarını da içerecek biçimde tablolarda sunulmuş ve yorumlanmıştır. Temaları açıklayan ifadeler katılımcı görüşlerini içeren doğrudan alıntılarla desteklenmiştir.

4. Bulgular

4.1. Konuma ilişkin bulgular

Katılımcıların hayalini kurdukları BİLSEM imgesinin yeri hakkındaki düşüncelerini dile getirdikleri "Ben BİLSEM binasının yeri olsaydım…" başlıklı görüşme formundan elde

edilen verilere göre; "*bahçe*" ve "*yakın çevre*" olmak üzere iki temanın öne çıktığı görülmektedir. Bahçe teması altında verilen yanıtlar kategorize edildiğinde değinme sıklığına göre; *yeşil alan* (10), *spor alanı* (9), *büyüklük (*8), *oyun alanı* (6), *canlı hayvan* (4) ve *donatı* (2) olmak üzere altı alt tema ortaya çıkmaktadır. Yakın çevre teması altında ise; *yeşil alan/doğa* (11), *erişilebilirlik* (8), *topoğrafya* (5), *trafik/gürültü* (5) ve *çevre yapılar* (3) olmak üzere beş alt tema bulunmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Katılımcıların hayallerindeki BİLSEM imgesinin yerine ilişkin bulgular

Tema	Alt tema	Frekans (f)			
		BYF	ÖYG	PÜ	Toplam
Bahçe ile ilgili	Yeşil Alan	4	3	3	10
	Spor Alanı	2	2	5	9
	Büyüklük	3	2	3	8
	Oyun Alanı	3	1	2	6
	Canlı Hayvan	3	-	1	4
	Donatı	2	-	-	2
		17	8	14	41
Yakın çevre ile ilgili	Yeşil Alan/Doğa	2	3	6	11
	Erişilebilirlik	-	3	5	8
	Topoğrafya	1	2	1	5
	Trafik/Gürültü	-	3	2	5
	Çevre yapılar	-	2	1	3
		3	13	15	31

Elde edilen verilere göre; katılımcıların hayallerindeki BİLSEM imgesinde bahçenin önemli bir yerinin olduğu görülmektedir. Mevcut BİLSEM binasında yapının kendine ait bir bahçesi olduğu fakat bu bahçenin yalnızca çeperlerinde ağaçlarla çevrili bir yeşil alan olduğu görülmektedir. Fakat bu alan öğrencilerin hayallerinde belirttikleri donanımda bir yeşil alan değildir. Katılımcıların değindikleri ve tanımladıkları bu bahçe hayaline göre; bahçenin yeşil alanlar barındırması ilk sırada değinilen alt tema olmuştur. "Bahçesi çimlerden oluşurdu" (Gökçe, ÖYG), "Bahçem çimenlik olurdu" (Elif, BYF), "Bahçem toprak/çim kısımları barındırırdı, çiçek bahçeleri ve farklı ağaç türleri bulunurdu" (Serpil, PÜ) gibi düşünceler katılımcıların bahçede hayalini kurdukları yeşil alanlara işaret etmektedir. Yeşil alan alt teması her yaş grubundan katılımcının değindiği alt temalardan biri olma özelliği göstermektedir. Katılımcıların bahçe teması altında değindikleri diğer alt tema spor alanları olmakla birlikte, bu tema altında katılımcıların futbol, voleybol, basketbol, tenis sahaları ve yürüyüş yolu isteklerini barındırmaktadır. BİLSEM binasının bahçesinde bir spor alanı bulunmamakta, öğrenciler spor yapmak veya oyun oynamak için BİLSEM bahçesinin parke taşlı alanını kullanmaktadır. Katılımcılar; "Bahçemde bolca spor aleti … gibi bazı oyun malzemeleri olmasını isterdim" (Batuhan, BYF), "Bahçemde voleybol, futbol, basketbol, tenis gibi oyun sahaları olurdu" (Mert, BYF), "Spor ve sanat için bahçede ek alan olurdu" (Ahmet, PÜ), "Spor alanım çok olurdu. En az üç tane saha" (Akif, PÜ), "Spor sahaları olmalı" (Tahir, PÜ) sözleri ile bahçede yer almasını istedikleri spor alanlarından söz etmişlerdir. Spor alanı alt teması daha çok, büyük yaş grubunu bünyesinde barındıran PÜ grubu katılımcılarının değindiği bir tema olmuştur. Hayallerindeki BİLSEM imgesinde bahçenin büyüklüğüne değinen katılımcılardan biri; "Bahçem geniş ve ferah olurdu" (Elif, BYF) sözleri ile düşüncelerini belirtmiştir. Mevcut BİLSEM binasının bahçesi büyük olmakla birlikte farklı etkinliklere olanak verecek biçim ve donanımda değildir.Oyun alanı, katılımcıların hayallerindeki BİLSEM'in bahçesinde yer alan dördüncü alt tema olmakla birlikte, tüm grupların değindiği bir alt tema olmuştur. Bu alt temaya değinen katılımcılar; "Bahçemde bolca

spor aleti ve kaydırak gibi bazı oyun malzemeleri olmasını isterdim" (Batuhan, BYF), "Bahçemde bisiklet, kaykay sahaları, büyük kaydırakları olan bir oyun parkı gibi daha bir sürü yer var" (Mert, BYF), "Bahçemde spor ve oyun alanları olurdu" (Serpil, PÜ), "Küçük yaştaki öğrencilerin rahatça vakit geçirebileceği, oyunlar oynayabileceği geniş bir bahçe tasarlardım" (Nisa, PÜ) sözleri ile kaydırak, salıncak gibi oyun materyalleri ile bisiklet yolları ve kaykay sahaları gibi çeşitli oyun alanlarına sahip BİLSEM hayallerinden söz etmişlerdir. Oyun alanı alt teması daha çok küçük yaş grubu olan BYF grubu katılımcılarının değindiği bir alt temadır. BİLSEM binasının bahçesinde salıncak, kaydırak gibi oyun alanları bulunmamakta, bisiklet, kaykay sahaları gibi farklı içerikte oyun mekanları yer almamaktadır.

"Ağaçlarda kuş olurdu" (Elif, BYF), "Ormanın içinde hayvan sesleri olurdu" (Hakan, BYF) sözleri ile canlı hayvanlara değinen öğrenciler; ağaçlardan gelen kuş ve hayvan sesleri doğaya ve doğal alanlara olan özlemlerine vurgu yapmışlardır. Öğrencilerden biri; "BİLSEM keşke daha büyük olsa, bir yerine kediler için yuva yapsak, isteyenler gelip sahiplense" (İlay, BYF) sözleri ile bahçede bakımını üstelenecekleri, ziyaretçilerin gelip sahiplenebilecekleri evcil hayvanlara da değinmiştir. Donatıya değinen katılımcılar ise "Bahçemde oturulacak banklar ve açık büfe olurdu" (Mert, BYF) sözleri ile bahçede bulunmasını istedikleri banklara ve bir şeyler atıştırmak için ihtiyaç duydukları büfeye vurgu yapmışlardır. Canlı hayvan ve donatı alt temaları değinme sıklığına göre irdelendiğinde; daha çok BYF grubu öğrencilerinin vurguladığı bir alt tema olarak dikkat çekmektedir. BİLSEM binasının bahçesinde katılımcıların hayallerinde belirttikleri canlı hayvan bulunmamakta, öğrencilerin oturmalarına, sohbet etmelerine, bir şeyler yemelerine olanak sağlayacak donatı elemanlarına da rastlanmamaktadır.

Katılımcıların hayalini kurdukları BİLSEM imgesinin yerine ilişkin bulgulara göre; katılımcıların "bahçe" ile ilgili isteklerinin yanı sıra "yakın çevre" ile ilgili de bir takım istek ve beklentilerinin olduğu görülmüştür. "Yakın çevre" teması altında ilk sırada değinilen alt tema; "yeşil alan/doğa" olmuştur. Katılımcıların hayalini kurduklarını BİLSEM imgesinin yerine göre; BİLSEM binasının yeşil alanlara/doğaya yakın bir konumda olması gerekmekte, binanın çevresinin çeşitli ağaç ve bitkilerle çevrilmiş olması beklenmektedir. "Yeşil alan/doğa" alt temasına değinen katılımcıların açıklamaları şöyle özetlenebilir; "Ormanlık yere yakın olurdum" (Mert, BYF), "Yeşilliği bol olan, ormanlık bir yerde olurdum" (Mete, ÖYG), "Etrafı ağaç ve çeşitli bitkilerle çevrili, doğal bir görüntüm olurdu" (Nisa, PÜ). Bu alt tema daha çok büyük yaş gruplarını temsil eden PÜ grubu öğrencilerinin değindiği bir alt tema olmuştur. Çevresel farkındalıklarının daha yüksek olduğu anlaşılan bu yaş grubu BİLSEM öğrencilerinin çevrelerinde yeşil alan/doğa görmek istedikleri anlaşılmaktadır. Mevcut BİLSEM yapısı ele alındığında ise yapının yeşil alanlara yakın konumlandığı fakat katılımcıların belirttiği gibi ormanlık bir alan içerisinde veya yakınlarında bulunmadığı, çevresinde farklı türde ağaç ve bitki barındırmadığı görülmüştür.

Katılımcıların zihinlerindeki BİLSEM imgesine göre; BİLSEM binasına kolay ulaşım sağlamak oldukça önemlidir. Katılımcıların bu konu hakkındaki görüş ve düşünceleri "erişilebilirlik" alt teması altında verilmiştir. "Merkezi bir yerde olurdum, öğrencilerin kolay gelebilmesi için" (Selcen, ÖYG), "Ulaşımı kolay, şehre yakın ama sadece oraya gelmek isteyenlerin geldiği bir yer olurdum" (Tahir, PÜ) şeklindeki açıklamalar BİLSEM binasına ulaşımın katılımcılar için önem teşkil ettiğini göstermektedir. Burada BYF grubu öğrencilerinin bu alt temaya değinmedikleri dikkat çekmektedir. Daha küçük yaş gruplarını barındıran BYF grubu öğrencileri sıklıkla BİLSEM'e aileleri tarafından ve özel

araçla ulaşım sağlamaktadır. Bu durum bu yaş grubu öğrencilerinin erişilebilirlik problemi ile henüz karşılaşmadıklarını, fakat kuruma tek başına ulaşım sağlayabilecek olgunlukta olan öğrencilerin birtakım problemler yaşadıklarını göstermektedir.

Topoğrafya alt teması; BİLSEM binasının yer aldığı arsa ve çevre koşullarına ilişkin değerlendirmeleri içermektedir. "Yükseltisi fazla olmayan, düzlükte bir yer olurdum" (Mine, ÖYG) şeklinde açıklama yapan bir katılımcı bu sözleri ile arsa verilerine değinmiş, "Güneş alan, ılık bir yerde olurdum" (Batuhan, BYF) sözlerini kullanan bir diğer katılımcı ise bu sözleri ile çevre koşullarına vurgu yapmıştır. Mevcut BİLSEM binası bulunduğu coğrafya nedeniyle eğimli bir arazi üzerinde bulunmaktadır. Fakat yapının araziye yerleştirilmesi sonucu arka bahçesinde oluşan istinat duvarı arka bahçenin nispeten karanlık olmasına ve cazibesini kaybetmesine sebep olmaktadır. Katılımcıların bu görüşleri mevcut yapı ile katılımcı hayallerindeki zıtlığa işaret etmektedir.

Trafik/gürültü alt teması katılımcıların yakın çevre teması altında değindikleri bir diğer alt temadır. Katılımcılar bu alt tema altında şehrin kalabalığından ve şehirdeki trafik gürültüsünden uzak, sessiz ve sakin bir bölgede bulunan BİLSEM imgesi yaratmışlardır. Katılımcıların BİLSEM çevresindeki manzarayı ve yapıları değerlendirdikleri "çevre yapılar" alt teması altında katılımcıların; "Pencereden dışarı baktığımda denizin göründüğü ve yüksek binaların görünmediği bir yerde olurdum." (Gökçe, ÖYG), "Çevrenin apartmanlarla dolu olmadığı bir yerde olurdum, belki şehir merkezinden biraz uzak olurdum." (Sevgi, PÜ) şeklindeki açıklamaları bulunmaktadır. Bu açıklamalar katılımcıların hayallerindeki BİLSEM imgesine göre çevrelerinde görmeyi hayal ettikleri özellikleri tanımlamaktadır. Çünkü mevcut BİLSEM binası deniz ile görsel ilişki kurmayan, çevresinde yüksek katlı yapıların yer aldığı bir bölgede yer almaktadır. "Trafik/gürültü" ve "çevre yapılar" alt teması BYF grubu öğrencilerinin değinmedikleri alt temalardandır. Bu durum küçük yaş grubu öğrencilerinin çevresel farkındalık düzeylerinin diğer yaş gruplarına kıyasla daha düşük olduğunun bir göstergesi sayılabilir.

4.2. İmaja İlişkin Bulgular

Hayallerindeki BİLSEM imgesini tanımlayan katılımcıların "Ben BİLSEM binasının imajı olsaydım…" başlıklı föye verdikleri yanıtlardan elde edilen verilere göre; en çok değinilen temalar sırası ile *cephe yüzeyi* (28), *kat yüksekliği* (13), *biçim* (9) ve *çatı* (4) temaları olmuştur (Tablo 2).

Tablo 2. Katılımcıların hayallerindeki BİLSEM imgesinin imajına ilişkin bulgular

Tema	Alt tema	Frekans (f)			
		BYF	ÖYG	PÜ	Toplam
Cephe Yüzeyi	Renk	5	4	3	12
	Desen	2	3	4	9
	Şeffaflık	2	3	2	7
		9	10	9	28
Kat Yüksekliği	Çok Katlı	2	3	3	8
	Tek Katlı	3	1	1	5
		5	4	4	13
Biçim	Yapı Biçimi	1	5	1	7
	Giriş Biçimi	-	1	1	2
		1	6	2	9
Çatı		2	1	1	4

İlk sırada değinilen tema olan cephe yüzeyi ile ilgili verilen yanıtlar incelendiğinde; katılımcıların *renk* (12), *desen* (9) ve *şeffaflık* (7) ile ilgili detaylara değindikleri görülmektedir. Renk temasına değinen katılımcıların bir kısmı "siyah, beyaz ve sarı renk olsaydı güzel olurdu" (İlay, BYF), "Rengim gri, siyah ve beyaz olurdu" (Tahir, PÜ), "Rengimi gri seçerdim" (Barış, ÖYG) gibi açıklamaları ile siyah ve beyaz değerlere vurgu yaparken: "Gökkuşağı renklerinden olurdum" (Batuhan BYF), "Rengarenk olurdum çünkü o zaman iç açıcı olur sıkıcı olmazdım" (Mert, BYF), "Diğer binalar arasında fark edilebilecek renkte olurdum" (Ahmet, PÜ) gibi açıklamalar ile farklı renklere değinen katılımcılar da dikkat çekmektedir. Mevcut yapının cephe yüzeyinde kullanılan renklerin sade oluşu bazı katılımcıların hayalleri ile örtüşürken, daha renkli bir cephe hayali kuran katılımcıların hayalleri ile örtüşmemektedir.

Cephe yüzeyi teması altında bulunan desen alt teması; katılımcıların BİLSEM cephe yüzeyi üzerinde bulunan geometrik şekiller, resim, kimya, fen bilimleri gibi dersleri temsil edecek simgeler ve malzeme kullanımlarını içeren açıklamalarından oluşmaktadır. Katılımcılardan birinin "Merak ve keşif duygusu uyandıracak teknolojik bir cephe olurdum" (Mete, ÖYG) şeklindeki açıklamaları kullanılacak malzemeler ile cephe-teknoloji ilişkisine dikkat çekerken, bir başka katılımcının "Cephede değişik tasarımlar olurdu, bu da kurumun klasik bir eğitim yeri, okul olmadığını vurgulardı" (Nisa, PÜ) açıklamaları BİLSEM'in geleneksel eğitim ortamlarından farklı görünmesini istediğini göstermektedir. Mevcut yapının cephesinde katılımcıların hayallerinde değindikleri gibi bir bilim ve sanat imgesi taşıyan bir desene rastlanmamaktadır. Yapı, geleneksel okul yapılarının görünümünden farklılaşan bir cephe organizasyonuna da sahip değildir. Cephe yüzeyindeki şeffaflık alt temasına değinen katılımcılar; "Pencerelerim çok olurdu" (Hakan, BYF), "Dış yapısında ağırlıklı olarak cam kullanılmasını isterdim" (Mine, ÖYG), "Binanın aydınlatmasının yeterli olabilmesi için pencerelerin geniş olmasını hem de hoş durmasına dikkat ederim" (Selcen, ÖYG), "Otel gibi, çok camlı, çok ışıklı" (Ahmet, PÜ) sözleri ile hayallerindeki BİLSEM imgesinin görünüşünü daha fazla açıklık, cam ve pencere kullanımı ile ifade etmiştir.

Kat yüksekliği, katılımcıların BİLSEM cephesi ile ilgili değindiği diğer temadır. Katılımcılardan: "Üç katlı olurdum fakat geniş bir yer kaplardım" (Barış, ÖYG), "Üç kattan fazla olmazdım" (Serpil, PÜ), "Dört katlı olurdum çünkü tüm sınıfları büyük bir şekilde içime almak isterdim" (Mete, ÖYG) sözleri ile yapının birden fazla kat sayısına sahip olmasını istediklerini belirtenler ile, "Tek katlı olurdu çünkü merdiven çıkmak yorucu ve tek kat güzel görünürdü" (Hakan, BYF), "Çok katlı olmak yerine daha geniş bir alana yayılan bir bina olurdum" (Ahmet, PÜ) sözleri ile yapının tek katlı olması gerektiğine vurgu yapan katılımcıların da olduğu görülmektedir. Burada dikkat çeken; her iki görüşte de yapının tüm eylem alanlarını içinde barındıracak kadar geniş bir hacme sahip olması gerektiği yönündeki açıklamaların varlığı olmuştur. Mevcut BİLSEM binası ise zemin+iki kattan oluşmaktadır. Bu bağlamda mevcut BİLSEM binasının katılımcıların hayallerinde söz ettikleri kat yüksekliğine ilişkin beklentilerini karşılamadığı anlaşılmaktadır.

Katılımcıların hayallerindeki BİLSEM imgesinin cephesine ait bir diğer özellik *biçim*dir. Bu tema altında en sık vurgulanan alt temayı *yapı biçimi* oluşturmaktadır. Yapı biçimine değinen katılımcılar, yapının yakın çevredeki diğer yapılardan biçim olarak farklılaşmasını ve yapının modern bir görünüşe kavuşturulmasını istemişlerdir. Bir katılımcı; "Etrafımdaki binalardan tamamen farklı bir tasarıma sahip olurdum" (Zeynep, ÖYG) sözleri ile yapının farklılaşması gerektiğine, bir başka katılımcı ise; "Şeklim sıradan binaların aksine öğrencilerin tasarladığı şekilde olurdu" (Mete, ÖYG) açıklamaları ile tasarımda söz sahibi olmak istediğine vurgu yapmıştır. "Büyük bir bina

olurdum ve ilkokul, ortaokul ve lise olarak üçe ayrılacak şekilde bölünürdüm" (Mine, ÖYG) açıklamaları yapan katılımcının ise yaş gruplarına göre organize edilen bir BİLSEM hayali kurduğu anlaşılmaktadır. Biçim temasının diğer alt temasını *giriş biçimi* oluşturmaktadır. Bu alt tema ile ilgili katılımcılardan biri "Merak ve keşif duygusu yaşatan bir giriş isterdim" (Gökçe, ÖYG) sözleri ile bina giriş cephesinin farklılaşması gerektiğini belirtmiş, diğeri ise "Giriş yüksek bir merdivenle olmazdı, en fazla 5-6 basamak olurdu ve giriş kapısı büyük ahşap bir kapı olurdu" (Serpil, PÜ) sözleri ile girişte yer alan merdivenlerdeki basamak sayısının azaltılmasını ve daha davetkar ve heybetli bir boşluktan yapıya giriş sağlamak istediğini belirtmiştir. Mevcut yapının ise sahip olduğu biçim ile çevredeki yapılardan farklılaşmadığı, yapı girişinin ise merdivenle çıkılan davetkar bir girişe sahip olmasına rağmen, katılımcıların belirttiği gibi ahşap bir kapı veya heybetli bir boşluğa sahip olmadığı görülmektedir.

Katılımcıların değindiği son tema *çatı*dır. Bu temaya değinen katılımcılar: "Binanın üstüne yeşil bir alan yapardım" (İlay, BYF), "Çatıda meyve sebze yetiştirmek için yerler olurdu" (Elif, BYF), "Çatıda çeşitli bitkiler olsun isterdim" (Barış, ÖYG) sözleri ile çatıda meyve-sebze yetiştirme gibi isteklerden ve çatının yeşil alanla kaplı olmasını istediklerinden söz etmişlerdir. BİLSEM binasının çatısı katılımcıların değindiği eylemlere olanak verecek bir organizasyona sahip değildir.

4.3. Eylem-Mekân İlişkisine Dair Bulgular

Katılımcıların hayallerindeki BİLSEM'de gerçekleştirmek istedikleri eylemlerden söz ettikleri ve bu eylemleri gerçekleştirmek istedikleri mekân/mekânlara veya mekân parçalarına göre eylem-mekân eşleştirmesi yaptıkları veriler analiz edilerek katılımcıların gereksinimlerine göre sıralanmış ve kategorilere ayrılmıştır. Bu kategori bireyin gelişim alanlarına göre üç temel başlık altında değerlendirilmiştir. Bu başlıklar sırası ile; bilişsel gelişim, psiko-motor gelişim ve sosyo-duygusal gelişimdir. Bilişsel gelişim, bireyin kendini ve çevresini anlama, anlamlandırma ve öğrenme eylemini gerçekleştirmesine yarayan zihinsel etkinlikleri ifade etmektedir. Psiko-motor gelişim, bireyin fizyolojik gelişimi ile ilişkili ve paralel olarak motor becerilerinin gelişmesini sağlayan etkinlikler iken, sosyo-duygusal gelişim ise bireyin içinde yaşadığı toplumla uyumlanma hali anlamına gelmektedir [14]. Bu bağlamda; katılımcıların söz ettiği resim yapmak, araştırma yapmak, kitap okumak, deney yapmak, çalışmak, keşif yapmak gibi eylemler bilişsel gelişim alanını destekleyen; uzanmak, oturmak, spor yapmak, koşmak gibi eylemler psiko-motor gelişim alanını destekleyen ve oyun oynamak, sohbet etmek, toplantı yapmak gibi eylemler ise sosyo-duygusal gelişim alanını destekleyen eylemler olarak gruplanmıştır.

Katılımcılar BİLSEM'de gerçekleştirmek istedikleri bu eylemlerden en çok bilişsel gelişim alanlarını destekleyen eylemlere (80) değinmiş, ardından psiko-motor gelişim alanını destekleyen eylemler (65) ve sosyo-duygusal gelişim alanlarını destekleyen eylemler (21) gelmiştir. Bilişsel eylemler arasında en çok söz edilen üç eylem sırası ile resim yapmak (15), araştırma yapmak (10) ve kitap okumak (9) olmuştur. PÜ grubu katılımcıları en çok rahatlatıcı etkisi olan resim yapmak (10) eylemine değinirken, ÖYG grubu katılımcıları ise bilimsel araştırma sürecinin bir parçası olan araştırma (6) ve keşif yapmak (6) gibi eylemlerden daha fazla söz etmiştir. Psiko-motor gelişim alanını destekleyen eylemler irdelendiğinde; yemek yemek (14), uzanmak (14) ve oturmak (11) eylemlerinin katılımcıların en sık değindiği eylemler olduğu görülmektedir. Katılımcıların BİLSEM'de yapmak istedikleri bu psiko-motor eylemler aynı zamanda okul sonrası söz konusu kurumlara gelen bu öğrencilerin fiziksel ihtiyaçlarına da vurgu

yapmaktadır. Katılımcıların yanıtları eğitim programına göre incelendiğinde de BYF grubu öğrencilerinin uzanmak (6), ÖYG grubu öğrencilerinin yemek yemek (5) ve PÜ grubu öğrencilerinin ise oturmak (8) eyleminden söz ettiği dikkat çekmektedir. Anlaşılan odur ki; örgün eğitim sonrası BİLSEM'e gelen tüm yaş grubu öğrencileri günün yorgunluğunu atabilmek adına dinlenmeye ve karnını doyurmaya ihtiyaç duymaktadır. Sosyo-duygusal eylemlerden en çok söz edilen eylemler ise; oyun oynamak (9) ve sohbet etmektir (8). Bu durum söz konusu çocukların araştırma yapan, keşfeden, üreten üstün yetenekli olmalarının yanı sıra oyun oynamaya ve sohbet etmeye ihtiyaç duyan çocuklar olduklarının da göstergesi kabul edilmelidir. BYF grubu katılımcılarının daha çok oyun oynamaya (5), PÜ grubu katılımcılarının ise daha çok sohbet etmeye (5) değinmeleri yaş gruplarının sosyo-duygusal gelişim alanları üzerindeki etkisini göstermektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Katılımcıların BİLSEM'de yapmak istedikleri eylemlerin gelişim alanlarına ve eğitim programına göre dağılımı

Gelişim Alanları	**Eylemler**	**Frekans (f)**			
		BYF	**ÖYG**	**PÜ**	**Toplam**
Bilişsel Gelişim Alanı	Resim yapmak	2	3	10	15
	Araştırma yapmak	2	6	2	10
	Kitap okumak	4	3	2	9
	Deney yapmak	1	3	3	7
	Çalışmak	2	5	-	7
	Keşif yapmak	1	6	-	7
	Yazı yazmak	-	-	6	6
	Bireysel çalışmak	-	1	4	5
	Bitki yetiştirmek	2	1	1	4
	Uzanarak çalışmak	-	-	2	2
	Grupça çalışmak	-	-	2	2
	Müzik dinlemek	-	-	2	2
	Dışarıyı izlemek	2	-	-	2
	Şarkı söylemek	-	1	-	1
	Sergi gezmek	-	1	-	1
		16	**30**	**34**	**80**
Psiko-motor Gelişim Alanı	Yemek yemek	3	5	6	14
	Uzanmak	6	3	5	14
	Oturmak	-	3	8	11
	Spor yapmak	2	-	4	6
	Koşmak	3	1	1	5
	Kaymak	3	-	1	4
	Uyumak	3	-	-	3
	Dinlenmek	-	-	2	2
	Bisiklet sürmek	1	1	-	2
	Yürüyüş yapmak	-	1	1	2
	Basketbol oynamak	1	-	-	1
	Top oynamak	-	1	-	1
		22	**15**	**28**	**65**
Sosyo-duygusal Gelişim Alanı	Oyun oynamak	5	1	3	9
	Sohbet etmek	1	2	5	8
	Toplantı yapmak	1	-	1	2
	Gösteri yapmak	1	-	1	2
		8	**3**	**10**	**21**

Katılımcıların söz konusu eylemleri hangi mekânlarda gerçekleştirmek istediklerine ilişkin yanıtları incelendiğinde; en sık söz edilen mekânın bahçe (42) olduğu dikkat çekmektedir. Bunu, sınıf/atölye (32) ve çatı arasının (28) takip ettiği görülmektedir. Katılımcıların eğitim programına bir diğer deyişle yaş gruplarına göre cevapları irdelendiğinde ise; BYF ve ÖYG grubu öğrencilerinin en sık bahsettikleri mekânın bahçe olduğu, fakat PÜ grubunda en çok vurgulanan mekânın çatı arası olduğu dikkat çekmektedir. Yaş düzeylerinin küçük ve orta olduğu grupların sosyal ve kamusal bir alan özelliği taşıyan bahçeye, yaş düzeylerinin büyük olduğu grupların ise daha özel, kapalı ve mahrem bir alan niteliği taşıyan çatı katına değinmeleri katılımcıların yaş gruplarına göre farklılık gösteren nitelik ve gereksinimlerine ilişkin önemli ipuçları barındırmaktadır (Tablo 4).

Tablo 4. Katılımcıların BİLSEM'de yapmak istedikleri eylemler için söz ettikleri mekanlar ve mekân parçalarının eğitim programına göre dağılımı

MEKÂNLAR/MEKÂN PARÇALARI	**Frekans (f)**			
	BYF	**ÖYG**	**PÜ**	**Toplam**
Bahçe	16	11	15	42
Sınıf/Atölye	9	9	14	32
Çatı arası	4	5	19	28
Koridor	5	6	8	19
Pencere (Önü)	3	3	5	11
Merdiven	3	4	4	11
Duvarlar	2	3	2	7
Kantin	2	2	-	4
Gizli geçitler	-	3	-	3
Duvar içi / Niş	-	-	2	2
Bodrum	1	-	1	2
Laboratuvar	-	1	-	1
Park	1	-	-	1
Sahne	1	-	-	1
Çatı	-	1	-	1
Spor sınıfı	-	-	1	1
Etkinlik sınıfı	-	-	1	1
Puf yastıklar	1	-	-	1

Katılımcıların BİLSEM'de yapmak istedikleri eylemler ile bu eylemleri yapmak istedikleri mekânlar irdelendiğinde katılımcıların aynı mekân içerisinde birden fazla farklı eyleme değindikleri dikkat çekmektedir (Tablo 5). Örneğin katılımcılar koridorlarda; resim yapmak, araştırma yapmak, kitap okumak, çalışmak, keşif yapmak, yazı yazmak, şarkı söylemek, sergi gezmek, yemek yemek, uzanmak, oturmak, koşmak, kaymak, sohbet etmek gibi eylemlerde bulunmak istemektedirler. Bu durum katılımcıların gözünde koridorların yalnızca geçiş amaçlı olmadığını, kamusal alanlar veya bir kent meydanı gibi çok çeşitli ve birden fazla eyleme olanak sağlayacak alanlar olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Katılımcılar, sınıf/atölyelerde resim yapmak, araştırma yapmak, deney yapmak, çalışmak, yazı yazmak, bitki yetiştirmek gibi bilişsel gelişim alanlarını destekleyen eylemlerin yanı sıra, yemek yemek, uzanmak, oturmak, oyun oynamak ve sohbet etmek gibi psiko-motor ve sosyo-duygusal gelişim alanlarını destekleyen eylemlerde de bulunmak istediklerini belirtmişlerdir. Katılımcılara göre sınıf/atölyeler doğrudan

öğrenme eylemine ek olarak dinlenme, yemek yeme, sohbet etme, oyun oynama gibi dolaylı öğrenmeye de fırsat sunan çok işlevli mekânlar olmalıdır (Tablo 5).

Tablo 5. Katılımcıların BİLSEM'de yapmak istedikleri eylemlerin mekân ile ilişkisi

Gelişim Alanları	**Eylemler**	**Mekânlar/Mekân Parçaları**																		
		Koridor	Sınıf/Atölye	Merdiven	Bahçe	Pencere (Önü)	Çatı arası	Duvarlar	Duvar içi / Niş	Laboratuvar	Çatı	Gizli geçitler	Park	Sahne	Kantin	Spor sınıfı	Etkinlik sınıfı	Puf yastıklar	Bodrum
Bilişsel	Resim yapmak	1	2	1	2	1	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Araştırma yapmak	1	4	1	2	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	Kitap okumak	1	-	2	-	1	3	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-
	Deney yapmak	-	4	-	1	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	Çalışmak	1	4	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Keşif yapmak	1	-	1	2	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
	Yazı yazmak	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bireysel çalışmak	-	3	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bitki yetiştirmek	-	1	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Uzanarak çalışmak	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Grupça çalışmak	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Müzik dinlemek	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dışarıyı izlemek	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Şarkı söylemek	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sergi gezmek	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Psiko-Motor	Yemek yemek	3	1	-	3	1	2	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
	Uzanmak	1	2	-	5	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Oturmak	3	1	2	2	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Spor yapmak	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
	Koşmak	2	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kaymak	1	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
	Uyumak	-	-	-	3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dinlenmek	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bisiklet sürmek	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Yürüyüş yapmak	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Basketbol oynamak	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Top oynamak	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sosyo-duygusal	Oyun oynamak	-	3	-	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sohbet etmek	1	1	-	2	-	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Toplantı yapmak	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	Gösteri yapmak	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-

Katılımcılara göre merdivenler; iki farklı kot yüksekliğindeki alanları birbirine bağlayan geçiş güzergahı olarak değil, resim, araştırma, deney ve keşif yapmaya, kitap okumaya, çalışmaya, yazı yazmaya ve oturmaya olanak sağlayan çok işlevli düşey öğrenme güzergahları olarak görülmektedir. Bahçe ise katılımcıların en sık değindikleri mekân olmakla birlikte; resim, keşif ve araştırma yapma, kitap okuma, çalışma gibi öğrenme eylemlerin yanı sıra yemek yeme, uzanma, oturma, spor yapma, koşma, uyuma, bisiklet sürme, yürüyüş yapma, basketbol ve top oynama, oyun oynama, sohbet etme ve toplantı yapma gibi fiziksel ve sosyal etkinliklere de olanak veren açık hava öğrenme mekânları

olarak görülmektedir (Tablo 5). Katılımcıların gözünde bahçenin bu çok yönlü olma hali, BİLSEM bahçelerinin açık-yarı açık kamusal alanlar gibi düşünülmesi ve organize edilmesi gerektiğini gözler önüne sermektedir.

Pencere önü; resim yapma, kitap okuma, yazı yazma, müzik dinleme, dışarıyı izleme, yemek yeme, uzanma ve oturma gibi eylemler için ayrılan mekânlardan biridir. Bu alan katılımcılar için yarı özel alanlar gibi düşünülmüş, tekil eylem ve ihtiyaçlar için ayrılmıştır. Çatı arası katılımcıların sıklıkla değindiği mekânlardan diğeridir. Bu alan da tıpkı pencere önü gibi resim, araştırma, keşif yapma, kitap okuma, bireysel çalışma, uzanarak çalışma, müzik dinleme, yemek yeme, dinlenme gibi tekil eylemlere olanak sağlayan özel alanlar olarak söz edilmiştir. Fakat katılımcıların çatı arasında gerçekleşecek tekil eylemlerin yanı sıra oyun oynama ve sohbet etme gibi grup etkinliklerine de değinmeleri öğrencilerin yarı özel alanlara da ihtiyaç duyduklarını göstermektedir.

Katılımcıların söz ettiği birtakım mekânların ise yalnızca tek işlev/eylem ile ilişkilendirildiği dikkat çekmektedir. Örneğin laboratuvar mekânı deney yapmak, park alanı kaymak, sahne mekânı gösteri yapmak, kantin mekânı yemek yemek ve etkinlik sınıfı spor yapmak ile eşleştirilmiştir. Oysa; katılımcılar deney yapmak için sınıf/atölye ve bahçeden söz etmiş, kaymak için koridor ve merdivenlerin de uygun olabileceğini hayal etmiştir. Benzer şekilde katılımcılar; yemek yemek için yalnızca kantinden değil, koridor, sınıf/atölye, bahçe, pencere önü ve çatı arasından söz etmiştir. Öğrenciler, söz ettikleri eylemleri yalnızca söz konusu eylem için ayrılmış özel alanlarda değil, eğitim yapısının her bir alanında gerçekleştirmek istemektedir. Katılımcıların bu arzusu mekânın ve/veya mekânların birden fazla eyleme olanak verecek şekilde esnek organize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

5. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada mimari tasarımda katılımcı bir yaklaşım denenerek kullanıcıların Bilim ve Sanat Merkezleri'ne ilişkin istek, ihtiyaç ve beklentilerinin ortaya konulması hedeflenmiş, elde edilen verilerin sonraki tasarım çalışmalarında girdi oluşturabilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda kullanıcıların BİLSEM konumuna, imajına ve eylem-mekân ilişkisine dair istek ve beklentileri tespit edilmiştir.

Katılımcıların konum bağlamında beklentileri irdelendiğinde kurumların kent içerisinde kolaylıkla erişilebilir bir alanda ve toplu taşıma güzergahları üzerinde yer almasının ve sosyokültürel alanlara yakın planlanmasının oldukça önemli olduğu görülmüştür. Bayram [15], öğrencilerin eğitim tesisine erişimi ve güvenlik açısından eğitim alanları ve yer seçiminin stratejik önem taşıdığına değinmiştir. Çetiner [16] ise eğitim alanlarının konut bölgelerinin merkez yerleşimlerinde, yaya yolu üzerinde ve ikincil trafik ağına cephe verilerek tasarlanması gerektiğini belirtmiştir. BİLSEM'in doğal ve yeşil alanların yakınlarında yer alması veya yapının yakınlarında doğal/yeşil alanlara yer verilmesi katılımcıların BİLSEM konumu ile ilgili dile getirdikleri diğer gerekliliktir. Yapılan pek çok çalışma ile doğa ile iç içe olmanın insan sağlığını olumlu yönde etkilediği kanıtlanmıştır [17,18].

Katılımcıların imaj bağlamında beklentileri incelendiğinde; BİLSEM binasının cephe yüzeyinde kullanılacak çeşitli renklere, iç mekânda süregelen bilim ve sanat

etkinliklerinin dış mekândan da anlaşılabileceği birtakım simge, sembol, malzeme ve desen kullanımlarına ve yapının cephesindeki şeffaflığı sağlayan cam ve pencere kullanımlarının arttırılmasına değinildiği görülmüştür. BİLSEM'in giriş mekânının ve cephesinin davet ediciliği de BİLSEM imajı açısından katılımcıların değindiği tasarım kriterlerinden biri olmuştur. Bu bağlamda kullanıcıların bir eğitim yapısı olan fakat sıradan eğitim yapılarından kullanıcı profili, eğitim programı ve içeriği ile farklılaşan BİLSEM binalarını davet edici bulması önemlidir. Bu anlamda BİLSEM binalarının içerisinde gerçekleşen bilim ve sanat etkinliklerinin dış mekâna da yansıması beklenmektedir. Sarıtaş ve diğerleri [19] velilerin BİLSEM'lere ilişkin görüşlerini incelediği çalışmalarında; bilim sanat merkezlerinin normal bir okuldan farksız tasarlanmış olmasının velilerde yarattığı hayal kırıklığını ortaya koymuşlardır. Bu çalışma sonucunda da binanın en etkin kullanıcısı durumunda olan öğrencilerin de cephe imajı konusunda aynı kaygıyı taşıdıkları anlaşılmıştır. Bir eğitim yapısının görünümü topluma eğitim ile ilgili çok önemli mesajlar iletmektedir [20]. Kötü bir görünüşe sahip ve bakımsız görünen okullar öğretmen, öğrenci ve velilerde değersizlik hissi uyandırmakta, topluma ise eğitime verilen değeri göstermektedir [21].

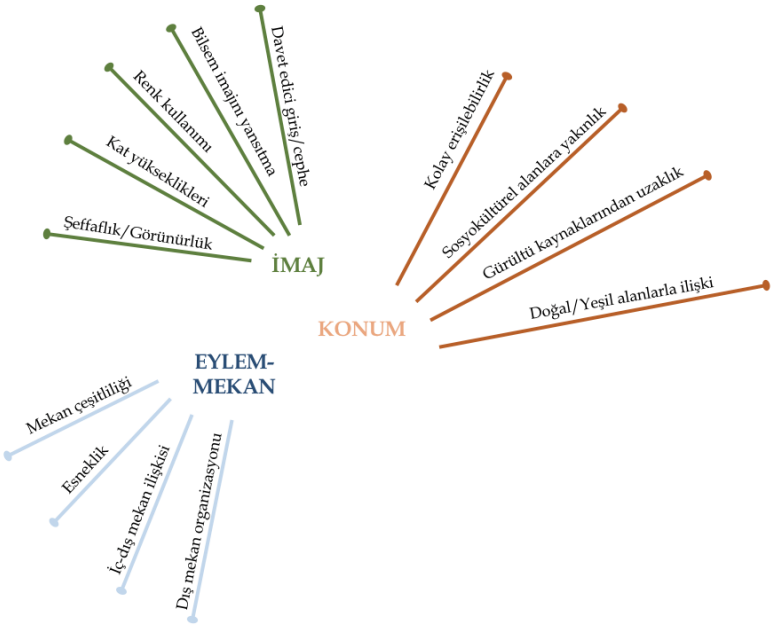
Katılımcıların BİLSEM'lerdeki eylem-mekân ilişkisinden doğan beklentileri ele alındığında ise; söz konusu kurumlardaki sınıf/atölye, laboratuvar, etkinlik sınıfı, spor salonu, sahne, sergi alanı gibi çok çeşitli öğrenme mekânlarından söz ettikleri görülmüştür. Bu mekânlar kullanıcıların yalnızca ders çalıştıkları değil, uzandıkları, yemek yedikleri, sohbet ettikleri, oyun oynadıkları mekânlar olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca kullanıcılar araştırma, keşif yapma, çalışma, kitap okuma gibi bilişsel eylemleri yalnızca öğrenme mekânlarında değil, koridor, bahçe, merdiven, çatı arası gibi farklı mekânlarda da gerçekleştirmek istediklerini vurgulamışlardır. Bu durum kullanıcıların gözünde bilim ve sanat merkezlerinin sınıflarına, atölyelerine ve laboratuvarlarına ek olarak bahçelerinin, koridorlarının, merdivenlerinin, pencere önünde veya duvar yüzeyinde oluşturulan niş mekânlarının, hatta çatı arası veya çatı gibi daha mahrem alanlarının bile öğrenme mekânlarına yardımcı mekânlar olarak hizmet edebileceğini göstermektedir. Örneğin kullanıcılar merdiveni, alt ve üst kat ile ilişki kuran mimari öğe olarak değil, resim ve araştırma yapabildikleri, yazı yazabildikleri, oturdukları, sohbet ettikleri ve oyun oynadıkları bir alan olarak tanımlayarak öğrenme eyleminin yalnızca sınıflarla sınırlı olmadığını, yapının her bir köşesinin farklı eylemleri gerçekleştirmek için bir fırsat niteliğinde olduğunu göstermişlerdir.

Çalışma sonucunda kullanıcıların aynı mekân içerisinde birbirinden farklı eylemlere de değindikleri görülmüştür. Bu durum mekânın esnekliğini gerektirmektedir. BİLSEM mekânlarından beklenen mekânın ve/veya mekânların birden fazla aktiviteyi yapmaya olanak sağlayacak, birbirine eklenen veya başka işlevlere dönüşebilen, tekil veya ekip çalışmalarına izin verecek esneklikte olmasıdır. Benzer şekilde katılımcıların bahçede yapmak istedikleri çalışmak, resim yapmak, deney ve araştırma yapmak gibi eylemler iç-dış mekân ilişkisinin önemini göstermektedir. Buna ek olarak mevcut BİLSEM binasının kullanıcıların istek, beklenti ve ihtiyaçlarını karşılayacak donanımda ve esneklikte olmadığı da gözler önüne serilmiştir. Katılımcılar hayallerindeki BİLSEM binasının yerinden söz ederken aslında mevcut yapıya ilişkin eleştirilerini, beklentilerini de dile getirmişlerdir. Mevcut BİLSEM bahçesinin yeterli yeşil alana sahip olmadığı, içerik ve çeşitlilik açısından zengin spor alanları barındırmadığı, bahçenin çeşitli eylemleri gerçekleştirecek büyüklükte olmadığı, çocuklar için oyun alanları içermediği ve oturma dinlenme elemanlarının yeterli sayıda bulunmadığı anlaşılmıştır.

Bunlara ek olarak cephe yüzeyinin katılımcıların beklentilerindeki gibi bilim ve sanat imajını barındırmadığı, çevredeki yapılardan farklılaşan bir görüntüye sahip olmadığı, davetkar bir giriş alanı vurgusu taşımadığı ve katılımcıların beklentilerindeki gibi -binanın çatısının dahi eğitime yardımcı mekan olarak kullanılması- yeşil çatı kaygısı taşımadığı görülmüştür.

BİLSEM'deki öğrencilerin araştırma, keşif yapma, kitap okuma gibi eylemlerin yanı sıra futbol, basketbol oynama, koşma, bisiklet sürme gibi hareket içeren eylemlere değinmeleri, BİLSEM öğrencilerinin "özel yetenekli" tanımlamasından önce "çocuk" tanımlamasına sahip olduğunu göstermektedir. Bir diğer deyişle bu çocuklar yalnızca proje üreten, okuyan, araştıran çocuklar değil, aynı zamanda özel yetenekli tanısı almamış diğer çocuklar gibi koşmaya, oynamaya, sohbet etmeye ihtiyaç duyan "çocuk"lar olarak görülmelidir.

Çalışma sonucunda Bilim ve sanat merkezleri geleneksel eğitim yöntemlerinden farklı olarak; tüm öğrencilerin değil belli bir zekâ seviyesinin üstünde veya belirli bir alanda üstün yeteneğe sahip öğrencilerin eğitim aldıkları, bu öğrencilerin ilgi alanlarına göre değişen/çeşitlenen eğitim yöntemlerine sahip eğitim ortamlarıdır. BİLSEM'leri diğer eğitim ortamlarından ayıran bu farklar çalışmaya katılan katılımcıların söz ettiği istek ve beklentilerden de kolaylıkla okunabilmektedir. Kullanıcının tasarım düşüncesine dahil edildiği bu çalışmada BİLSEM'deki kullanıcıların istek ve gereksinimlerinin gözetilerek organize edilmesi gerektiği ortaya konmuştur. Çalışmanın sonucunda kullanıcı-tasarımcı iş birliğine dayalı yeni bir BİLSEM imgesine ulaşılmıştır. Bu imge konum, imaj ve eylem-mekân olmak üzere üç ana başlık altında özetlenebilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Tasarımda kullanıcı-tasarımcı iş birliğine dayalı bir yaklaşım ile ortaya konan BİLSEM imgesi.

Konum;

- Kolay erişilebilirlik: Kurumların kent içerisinde kolaylıkla erişilebilir bir alanda ve/veya toplu taşıma güzergahları üzerinde yer alması öğrenci, öğretmen ve velilerin

kuruma erişimini kolay kılacak, kentlinin de kurum ile olan fiziksel ilişkisinin kurulmasına yardımcı olacaktır.

- Sosyokültürel alanlara yakınlık: BİLSEM'in hem öğrencileri hem de kentli için sosyal bir donatı olarak düşünülmesi ve diğer sosyal donatı alanları ile birlikte planlanması önemli bir gerekliliktir. Yakın çevredeki spor ve oyun alanları, canlı hayvan ve havuz gibi farklı deneyim alanları sunan alanlar BİLSEM binalarının çevrelerinde var olması beklenen sosyokültürel birimler olarak okunmalıdır.
- Gürültü kaynaklarından uzaklık: BİLSEM binalarının sessiz ve sakin bölgelerde, gürültü kaynaklarından uzak konumlandırılması gerekmektedir. Yapıların yakın çevrelerinde bulunan gürültüyü en aza indirmek amacıyla yalıtıma dikkat edilmeli, gürültü azaltıcı öğelere başvurulmalıdır.
- Doğal/yeşil alanlarla ilişki: Doğal ve yeşil alanlar BİLSEM'li öğrenciler için kurum dışı öğrenme ortamları olarak kabul edilmelidir. Bu alanların ağaçlar, çimler, bitkiler gibi çeşitli peyzaj elemanlarının yanı sıra yürüyüş yolu, futbol, basketbol gibi spor alanları, kaydırak, salıncak gibi oyun alanları ve bank, masa gibi farklı donatılar içererek ve rekreatif çeşitlilik sunacak şekilde organize edilmesi gerekmektedir.

İmaj

- Davet edici giriş/cephe: Yapı, cephesi ve giriş mekânı ile ilgi çekici ve davetkar olmalı, kullanıcılarına mekânın kimliği hakkında ve bilim ve sanat etkinliklerini içerdiğine ilişkin ipuçları taşımalıdır.
- BİLSEM imajını yansıtma: BİLSEM binasının içerisinde barındırdığı öğrenci profilini ve bilim ve sanat içeren proje tabanlı eğitim yöntemini bina imajı ile yansıtması beklenmektedir. Bu beklenti yapı cephesi üzerinde kullanılacak çeşitli simge, sembol, desen ve malzeme kullanımları ile sağlanabilir.
- Renk kullanımı: Renk kullanımı BİLSEM imajını yansıtmak ve kullanıcı beklentilerini karşılamak amacıyla uygulanabilecek çözüm önerilerinden biridir. Farklı malzeme, doku ve renklerdeki çeşitli simge ve sembollerin kullanıcı-tasarımcı iş birliğine dayalı olarak tasarlanması ile içeride gerçekleşen bilim ve sanat etkinliklerinin dış cepheden de algılanması sağlanabilmektedir.
- Kat yükseklikleri: BİLSEM binalarının tasarım kararları alınırken yapı içerisindeki eylem alanlarının ve mekânların kullanım hiyerarşisine ve kullanıcı yaş gruplarına göre dağılım göstermesi sağlanarak kat yükseklik farklarından yararlanmak yapı imajına katkı sağlayan çözüm önerilerinden biridir.
- Şeffaflık/görünürlük: BİLSEM binası içerisinde gerçekleşen bilim ve sanat etkinliklerinin, üretimlerin, projelerin, keşiflerin görünürlüğünü sağlamak, iç ve dış arasındaki ilişkiyi daha muğlak kılmak adına daha geçirgen cephe tasarım kararlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Eylem-mekân

- Mekân çeşitliliği: Farklı yaş ve yetenek alanlarındaki çocuklara çatı olan BİLSEM binalarının derslik, atölye, laboratuvar, spor sınıfı, etkinlik alanı gibi farklı içeriklerde öğrenme ortamlarına sahip olması gerekmektedir.
- Esneklik: BİLSEM mekânlarının aynı anda farklı etkinliklerin yapılmasına olanak sağlayacak esneklikte ve birbirine eklenebilen ve/veya başka işlevlere dönüşebilen özellikte olması beklenmektedir. Böylesi bir tasarım felsefesi uzun vadeli kullanıma da olanak sağlamaktadır. Katlanabilir cam veya duvar yüzeyleri, mekânlar arası akışkanlığı sağlayan açık plan çözümlemeleri, mekân geometrisi ve donatı organizasyonu mekânın esnekliğine yardımcı tasarım çözümlerindendir.

- İç-dış mekân ilişkisi: İç ve dış mekânlar arasındaki ilişkinin sağlanması da BİLSEM binaları için önemli bulunmuştur. Öğrencilerin doğa ile iç içe yaşayarak öğrenmesine olanak veren açık alanların iç mekânlar ile birlikte organize edilmesi, öğrenmenin dış mekâna da akmasına yardımcı olabilmektedir. Hava koşullarına göre gerekli önlemlerin alındığı açık hava sınıfları bu anlamda örnek oluşturabilir.
- Dış mekân organizasyonu: BİLSEM binalarının açık alanları öğrencilerin öğrenme eylemine devam etmelerinin yanı sıra dinlenme, oynama, enerjilerini boşaltma gibi ihtiyaçlarını da gözetecek şekilde organize edilmelidir. Bu bağlamda kurumların bahçelerinde çeşitli oturma ve oyun donatılarına yer verilmeli, basketbol, futbol gibi spor alanları ayrılmalıdır. Yağmur suyu toplama kuyuları, hayvan barınakları, uygulama bahçeleri veya hava koşullarına uygun tasarlanmış açık hava derslikleri gibi alanlar da öğrencilerin dış mekânda araştırma ve keşif yapmasına olanak sağlayacak deneyimler sunabilmektedir.

Bu çalışmada kullanıcıların ve tasarımcının birlikteliği ve iş birliği ile BİLSEM binaları için bir takım tasarım kriterleri sunmakla birlikte, eğitim yapıları özelinde de bir atölye çalışması örneği teşkil etmektedir.

Kaynaklar

[1] Lefebvre, H., **The urban revolution.** The Universty of Minnesota Press, 2. Baskı, Minneapolis, (2003).

[2] Boudon, P., **Lived-in architecture: Le Corbusier's pessac revisited,** The Mit Press Classics, Cambridge, Massachusetts, (1979).

[3] Sanoff, H. **Creating environment for young children,** North Carolina State University, (2016).

[4] Lee, Y., Design participation tactics, involving people in the design of their built environment. Phd Thesis, Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University School of Design, (2006).

[5] Hacıalibeyoğlu, F., Mimari tasarım sürecinde katılım sorunu ve yaklaşımlar, **Mimarlık,** 51, 379, 48-52. (2014).

[6] Lackney, J.A., **Thirty-three educational design principles for schools and community learning centers,** Washington DC, National Clearinghouse for Educational Facilities. (2000).

[7] Clark, A., **Listening to young children: a guide to understanding and using the mosaic approach,** British Library Cataloguing in Publication Data, Great Britain, (2017).

[8] Baykoç, N., **Üstün akıl, zekâ, deha, yetenek, dahiler-savantlar gelişimleri ve eğitimleri.** Vize Yayıncılık, Ankara, (2014).

[9] MEB, *Millî Eğitim Bakanlığı Bilim ve Sanat Merkezleri Yönergesi*. [https://orgm.meb.gov.tr/meb_iys_dosyalar/2016_10/07031350_bilsem_yonergesi. pdf], (3.01.2025)

[10] Gökdere, M. ve Küçük, M., Üstün yetenekli çocukların fen eğitimindeki durumu: Bilim sanat merkezleri örneklemi, **Kuram ve Uygulamada Eğitim Bilimleri Dergisi**, 3 1, 101-124, (2003).

[11] Sarı, H., Türkiye'de üstün yetenekli çocukların eğitim gördüğü bilim ve sanat merkezleri için öneriler. **Üstün Yetenekli Eğitimi Araştırmaları Dergisi,** 1, 2, Özel Sayı, 146-149, (2013).

[12] Holmes, G.R., **Doing your early years research project: a step by step guid,** London, Paul Chapman Publishing, (2005).

[13] Baş, T. ve Akturan, U., **Sosyal bilimlerde bilgisayar destekli nitel araştırma yöntemleri**, **odak grubu çalışması**, Seçkin Yayınevi, Ankara (2017).

[14] Örmeci, Ö. *Nörolojik gelişim, gelişimin değerlendirilmesi*. [https://acikders.ankara.edu.tr/mod/url/view.php?id=126624], (03.01.2025).

[15] Bayram, Z.Y., Eğitim alanı ve yer seçimi ilkeleri, **Eğitim Yapıları ve Tasarımı içinde** (s.222-240). Ankara: PEGEM Akademi, (2019).

[16] Çetiner, A., **Şehir planlamasında çalışma yöntemleri ve ifade teknikleri.** İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi, (1979).

[17] Ulrich, R.S., View through a window may influence recovery from surgery. **Science,** 224 (4647), 420-421, (1984).

[18] Park, S.H., Randomized clinical trials evaluating therapeutic influences of ornamental indoor plants in hospital rooms on health outcomes of patients recovering from surgery. Yayınlanmamış doktora tezi, Kensas State University, Manhattan, Kansas, (2006).

[19] Sarıtaş, E., Şahin, Ü. ve Çatalbaş, G., Velilerin gözüyle BİLSEM. **Eğitimde Nitel Araştırmalar Dergisi,** 7, 1, 114-133, (2019).

[20] Young, E., Green, H. A., Roehrich-Patrick, L., Joseph, L. ve Gibson, T., **Do K-12 school facilities affect education outcomes?** A Staff Information Report, The Tennessee Advisory Commission on Intergovernmental Relations, (2003).

[21] Duran-Narucki, V., School building condition, school attendance and academic achievement in New York City public schools: A mediation model. **Journal of Environmental Psychology***,* 28, 278-286, (2008).

DOI:10.25092/baunfbed. 1659445 *J. BAUN Inst. Sci. Technol., 27(2), 802-823, (2025)*

Trends in research on out-of-school learning environments in mathematics education: A systematic review

Enes Fatih EĞE[1*], Hasan TEMEL[2] , Devrim ÜZEL[3]

[1]Balıkesir University Institute of Science, Primary Mathematics Education, Balıkesir.
[2]Dr. Balıkesir University, Necatibey Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Division of Mathematics Education, Balikesir
[3]Prof. Dr. Balıkesir University, Necatibey Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, Division of Mathematics Education, Balikesir

Geliş Tarihi (Received Date): 17.03.2025
Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.07.2025

Abstract

This study aimed to examine research on out-of-school learning environments in mathematics education from a holistic perspective through a systematic review and to identify prevailing trends. By comparing the general characteristics and methods of studies on out-of-school learning environments in mathematics education conducted at the national level in Türkiye and in the international arena, this study aimed to highlight their similarities and differences. Adhering to the Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis (PRISMA) 2020 criteria, 36 studies were included in the analysis. The document analysis method was employed to analyze the selected studies. Within the framework of the analyses carried out, it was determined that qualitative studies were generally preferred, while quantitative and mixed-methods studies were relatively less common. Regarding the temporal distribution of the studies, it was observed that most national-level research was conducted from 2018 onward. When examining the study groups, it was found that both national and international studies primarily focused on middle school students. Furthermore, the findings indicate that existing studies broadly aim to assess the current state of out-of-school learning environments in mathematics education. However, there is a need for more research on designing effective out-of-school learning environments and developing activities to enhance mathematics learning.

Keywords: *Out-of-school learning environments, mathematics education, systematic review*

[*]Enes Fatih EĞE, enesfatih557@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-2778-6954
Hasan TEMEL, hasan.temel@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0003-4532-0529
Devrim ÜZEL, duzel@balikesir.edu.tr, https://orcid.org/0000-0001-9254-0490

Matematik eğitiminde okul dışı öğrenme ortamlarına yönelik yapılan çalışmaların eğilimleri: Bir sistematik derleme çalışması

Öz

Bu çalışmada matematik eğitiminde okul dışı öğrenme ortamlarına yönelik çalışmaların sistematik derleme yoluyla, bütüncül bir bakış açısıyla incelenip eğilimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ulusal ve uluslararası literatürde matematik eğitimindeki okul dışı öğrenme ortamlarına yönelik çalışmaların genel özellikleri ve yöntemleri karşılaştırılarak bu alandaki çalışmaların benzer ve farklı yönlerinin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda Sistematik Derleme ve Meta-Analiz Çalışmaları için Tercih Edilen Raporlama Öğeleri (PRISMA) 2020 ölçütleri dikkate alınmış ve 36 çalışma, araştırma kapsamına dahil edilmiştir. Çalışmaların analizi için doküman incelemesi yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler çerçevesinde çalışmalarda genellikle nitel araştırmaların daha çok tercih edildiği, nicel ve karma türündeki çalışmaların görece daha az olduğu belirlenmiştir. Çalışmaların yıllara göre dağılımına odaklanıldığında, ulusal düzeydeki çalışmaların büyük çoğunluğunun 2018 yılı ve sonrasında gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır. Araştırmaların çalışma grubu incelendiğinde ise ulusal ve uluslararası alanda ortaokul düzeyindeki çalışmaların daha çok tercih edildiği görülmüştür. Bulgulardan hareketle matematik eğitiminde okul dışı öğrenme ortamlarına yönelik daha çok durum tespitine yönelik çalışmaların gerçekleştirildiği, matematik eğitiminde okul dışı öğrenme ortamlarının nasıl tasarlanacağı ve ne tür etkinliklerin matematik eğitiminde öğrenmeleri daha etkin kılacağına yönelik çalışmalar daha çok ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Bu çerçevede araştırmacılara yönelik birtakım önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: *Okul dışı öğrenme ortamları, matematik eğitimi, sistematik derleme*

1. Introduction

In the age of technology, where information can be accessed through various means, individuals are expected to take advantage of these opportunities and actively engage in the education process. It is essential for individuals to actively participate in the educational process to develop not only cognitive skills but also psychomotor and affective skills [65]. Studies have shown that classroom learning activities in which students do not actively participate fail to achieve permanent and practical learning, resulting in limited outcomes [7]. For individuals interacting with their environment to acquire knowledge and achieve lasting and desired behavioural changes in both outcomes and processes, the settings for these interactions should be diverse [35]. In this context, the perspective that education should extend beyond the classroom and that schools should serve as a microcosm of real life becomes prominent [39].

Today, shifts in thinking about the role of schools, traditionally viewed as centers of knowledge transfer, are emerging. Societies striving to keep pace with the changing times place importance on raising individuals who are knowledgeable, competent, and aware of their national values. At this point, societies prioritize fostering permanent and effective student learning through process-oriented approaches and skill-based educational models in schools and institutions [57]. This intellectual shift observed in

institutions offering formal education highlights the need for teaching programs designed to provide a multi-dimensional perspective, a skill that requires direct interaction with the environment. Since in-school and classroom activities alone are insufficient to address this transformation, classroom education must be complemented by learning environments outside the school [31, 64].

The concept of out-of-school learning, also known as non-formal learning, is founded on the principle of integrating formal education with daily life experiences. Additionally, out-of-school learning highlights the importance of designing everyday spaces to align with experience-based activities. Out-of-school learning environments enable students to learn at their own pace and meet the objectives outlined in the curriculum [56, 13]. Utilizing spaces for informal learning, such as libraries, museums, natural areas, science and art centers, and zoos as tools for formal education, represents a foundational aspect of this approach [45]. Experiences in informal learning environments enhance students' interest, curiosity, and motivation in their studies while strengthening their cognitive abilities [51].

The fundamental characteristics of education within the framework of out-of-school learning environments are outlined as follows [77].

- Designed in accordance with the curriculum and educational philosophy.
- The places to be preferred should have a systematic design and be suitable for the students' readiness level.
- Include institutions outside the school related to the subject or concept to be taught.
- The mentioned areas allow students to develop social relationships outside the school boundaries.

The characteristics expected to develop in students who benefit from out-of-school learning environment activities that allow the use of different types of intelligence are emphasized as follows [24, 69].

- Being able to observe, infer, and predict.
- Being able to recognize and explain course-related materials.
- Problem solving.
- Adapting to group members.
- Learning by discovery and analytical thinking.
- Experiencing materials that cannot be encountered within school boundaries.

Considering the benefits they offer students, out-of-school learning environments clearly represent an essential education component. The 2023 Vision Document by the Ministry of National Education (MoNE) in Türkiye highlights the importance of integrating out-of-school learning environments into education and training. The 2023 Vision Document emphasizes that fostering creative thinking, research, inquiry, and discovery within the Turkish Education System can effectively be achieved beyond school boundaries [7]. Following the publication of the Vision Document in 2018, provincial directorates of national education across Türkiye initiated efforts in 2019 to establish recordable out-of-school learning spaces tailored to their specific needs. In the 2023 vision document, which emphasizes that every place that can be encountered in daily life can also be an education-training center, another noteworthy situation is that educational institutions should

provide learning environments where students can gain experience in cooperation with different institutions in the surrounding area [48].

Examining the curricula taught in Türkiye reveals evaluations of out-of-school learning environments. Several general objectives outlined in the curriculum published by MoNE in 2018 can be linked to out-of-school learning environments [39, 48]. In this context, some objectives related to the curriculum are as follows [48].

- Developing mathematical literacy skills and using them effectively.
- Understanding the relationship between people and objects and between objects and objects by using the language of mathematics effectively.
- Understanding mathematical concepts and using these concepts in daily life.
- Effectively managing one's learning process by developing metacognitive knowledge and skills.
- Developing a positive attitude towards mathematics through experience-based activities while learning mathematics and approaching problems confidently.
- Developing the skills to conduct research and produce and use the knowledge produced.
- Understanding the relationship between mathematics and art and aesthetics.

Considering these objectives in the curriculum, it is stated that educational activities should be directly related to daily life, prioritize socialization and personal development, and encourage students to engage in experience-based processes actively. Mathematics is one of the disciplines where out-of-school learning processes can be effectively applied. In this context, dedicated periods have been allocated for out-of-school learning activities in the 2024 Türkiye Century Education Model mathematics curriculum [49, 50].

When the studies in the literature on out-of-school learning environments are examined, it is noteworthy that the studies are predominantly in fields such as preschool, science, and social studies. Saraç [57] conducted a content analysis study on research on out-of-school learning environments in Türkiye. The study found that most of the research in Türkiye focused on the field of science. Studies also found that studies predominantly favoured nature practices, trips, museums, and science centers. Saraç, notes a lack of research on out-of-school learning in mathematics education in Türkiye. Many studies emphasize the insufficient research on out-of-school learning environments in mathematics education [8, 10, 37, 63].

Aydoğdu et al. [8] examined the opinions of 20 secondary school mathematics teachers regarding out-of-school learning environments in mathematics education. The study concluded that while teachers found such environments beneficial, they faced challenges due to economic, financial, and administrative constraints. Additionally, the research revealed that teachers had limited knowledge about out-of-school learning environments. Similarly, Kır et al. [39] explored mathematics teachers' perspectives on using out-of-school learning environments. Their study found that none of the 12 participating teachers had received training in these environments, concluding that mathematics teachers lack sufficient knowledge in this area.

Andersson and Johansson [2] and Sturm and Bogner [62] stated in their studies that out-of-school learning environments positively affect students' attitudes. Similarly, Bozdoğan [12], Bozdoğan and Yalçın [11], and Morag and Tal [47] reported that such environments

increase students' interest, while Çığrık and Özkan [20] noted their positive impact on students' motivation. Jarvis and Pell [29] found that out-of-school learning environments raise students' awareness and enhance their ability to connect mathematics to daily life. Genç et al. [27] also highlighted that these environments help develop 21st-century skills.

1.1. Purpose of research

Considering the new curriculum of the Turkish Century Education Model, it is emphasized that most mathematical skills are built on conceptual foundations, focusing on developing literacy skills [49, 50]. In both primary and elementary school levels of this curriculum, out-of-school learning activities are highlighted, and dedicated lesson hours are allocated for such activities [49, 50]. Mathematics teachers are, therefore, expected to implement practices that utilize out-of-school learning environments. However, Aydoğdu et al. [8] and Kır et al. [39] highlight that mathematics teachers lack sufficient knowledge about out-of-school learning environments. Additionally, Aydoğdu et al. [8], Kayhan-Altay and Yetkin-Özdemir [37], Bahadır and Hırdıç [10], and Temel [63] assert that research on out-of-school learning environments in mathematics education remains limited.

Given these circumstances, determining a clear framework for out-of-school learning in mathematics education and identifying effective activities and studies in this area are essential to supporting teachers and researchers working in the field. This study aims to systematically review research on out-of-school learning environments in mathematics education, providing a holistic perspective and identifying trends. Specifically, the study seeks to compare national and international research on this topic to uncover similarities and differences. Two primary outcomes are expected from the study: first, identifying trends and focus areas in research on out-of-school learning environments in mathematics education, and second, determining gaps in the literature to highlight the types of studies needed to advance the field.

1.2. Research problem

In line with the determined purpose, the research problem of the study was determined as follows:

What is the tendency (general situation) of studies on out-of-school learning environments in mathematics education?

1.2.1. Sub problems

National and internationally published studies on out-of-school learning environments in mathematics education;

Sub-Q1. What are the general characteristics (keywords, distribution by year)?
Sub-Q2. How is it distributed according to their methods (research design, sample, data collection tools, data analysis methods)?

2. Method

2.1. Research design

In this study, which examines trends in research on out-of-school learning environments within the scope of mathematics education, the systematic review method was selected as the preferred research approach. A systematic review is a research method designed

to summarize and synthesize the findings of studies conducted on similar topics [28]. This method not only integrates findings from studies in the chosen field but also provides a critical evaluation and addresses problems related to the field [26].

In recent years, systematic reviews have been increasingly utilized in education to simplify, synthesize, and make sense of complex, fragmented, or contradictory findings while also enhancing the generalizability of the results [71]. Known as a systematic review or systematic literature review, this approach was deemed appropriate for the present study because it examines all relevant published sources on the topic and reports the results comprehensively [32].

2.2. Data collection tools

Within the framework of examining studies on out-of-school learning environments in mathematics education, the ERIC, Web of Science, Google Scholar, and ULAKBIM TRDizin databases were utilized during the data collection process. The searches were conducted using keywords determined within the scope of the research. These keywords included: “okul dışı öğrenme ortamları”, “formal olmayan öğrenme ortamları”, “okul dışı öğrenme”, “matematik eğitimi”, “out-of-school learning”, “mathematics education,” and “out-of-school learning environments.”

The searches conducted in the databases based on these keywords are listed as follows:
"okul dışı öğrenme ortamları" matematik eğitimi
"okul dışı öğrenme ortamları" matematik
"okul dışı öğrenme" matematik
"formal olmayan öğrenme ortamları" matematik eğitimi
"sınıf dışı öğrenme" "matematik"
"out of school learning" math
"out of school learning" mathematics
Out of school learning environments
Non formal education topic mathematics

The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 criteria were applied throughout the data collection process. The PRISMA 2020 checklist is a guiding framework for conducting systematic reviews and meta-analyses [53]. According to the PRISMA 2020 guidelines, systematic reviews should be presented in alignment with the checklist [32]. The reporting of studies identified through the screening process, following the PRISMA 2020 flow diagram, is as follows:

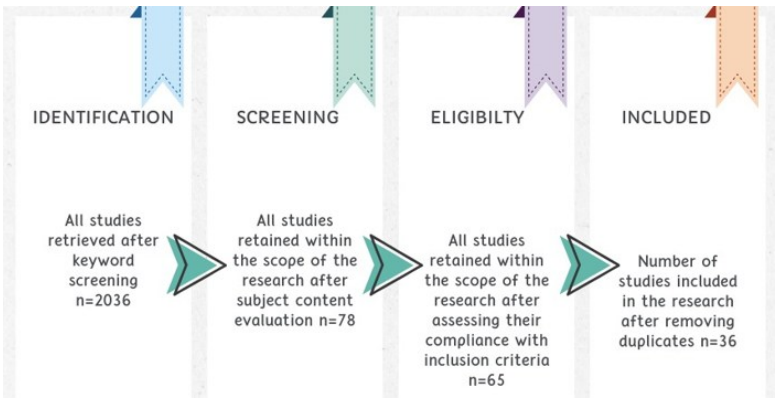


Figure 1. Steps followed in the literature review using the prisma 2020 flow diagram

Some inclusion criteria were determined to detect the studies to be included in the compilation within the diagram framework in Figure 1. The requirements determined during the inclusion process are listed as follows:

Table 1. Criteria for study exclusion and ınclusion

Included Studies	***Excluded Studies***
Open Access studies	Studies with no Access to Full Text
Article-type publications	Studies in the form of Master's and Doctoral Theses
Studies published in the Scope of Mathematics Education	Studies not within the scope of mathematics education
Studies published in the Scope of Out-of-School Learning	Studies not within the scope of mathematics education

2.3. Data analysis

Following the completion of the literature review, the studies to be included in the analysis were selected, and the document review method was chosen for their evaluation. Document analysis is a systematic research method used to examine the content of written materials [68]. To ensure a systematic approach during the document analysis, the selected studies were analyzed using the article review form [Appendix 1].

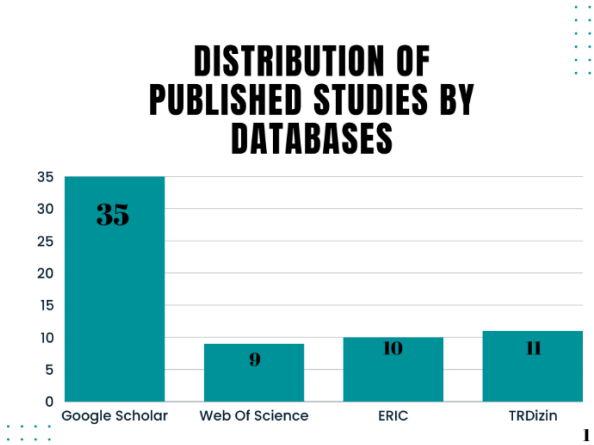
2.4. Validity and reliability

Each study included in the research was evaluated using the article review form. To ensure theoretical validity, it is recommended that evaluations involve experts other than the researcher [15]. Accordingly, the reliability of the analyses was enhanced by consulting experts with experience in out-of-school learning during the classification and analysis of the data. One method to increase the validity and quality of research is through detailed descriptions [70]. In this regard, each study stage was explained in detail, and introductory formats were provided to ensure validity. Clearly and comprehensively presenting the data analysis is also recognized as a method for enhancing the validity and reliability of research [18].

3. Findings

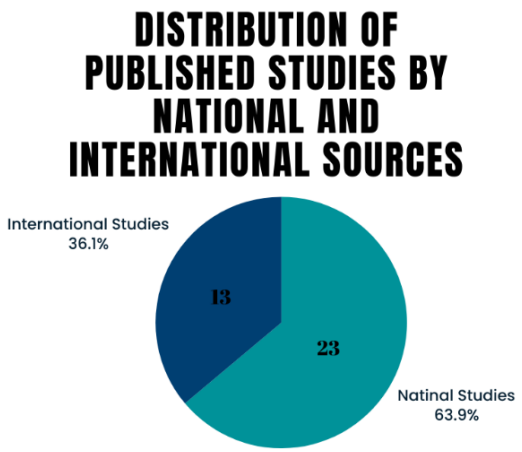
3.1. Findings regarding the first sub-problem

The findings related to the first sub-research question of the study 'What are the general characteristics (e.g., keywords, distribution by years) of the studies published nationally and internationally on out-of-school learning environments in mathematics education?' are as follows:



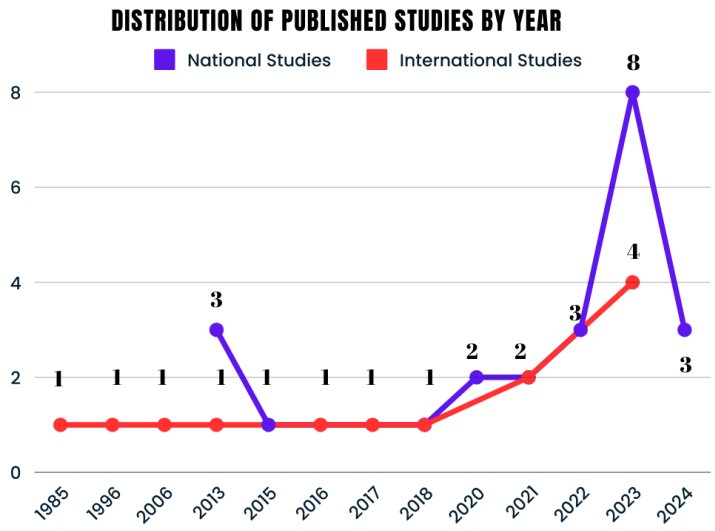
Graph 1. Distribution of published studies by databases

Referring to Graph 1, the distribution of studies obtained within the scope of the research across various databases reveals that 35 out of 36 studies (97.2%) are indexed in Google Scholar, 11 (30.6%) in TRDizin, 10 (27.8%) in ERIC, and 9 (14%) in Web of Science. The national and international distributions of the studies are presented in Graph 2.



Graph 2. Distribution of published studies by national and international sources

The distribution of published articles on out-of-school learning environments in mathematics education is presented in Graph 2. Of these studies, while 23 (64%) were published nationally, 13 (36%) were published internationally. A line graph was used to compare the yearly distribution of national and international studies included in the research. The distribution of these studies by years is as follows:



Graph 3. Distribution of published studies by years

An examination of Graph 3 reveals that studies published internationally on out-of-school learning environments in mathematics education date back to 1985. Although there was no significant increase in international studies after 1985, they continued sporadically until 2023, when a noticeable rise occurred compared to previous years. In the national context, the first studies began in 2013, with a marked increase observed from 2018 onward. Notably, the rise in national studies in 2023 mirrors the trend in international studies.

Another aspect examined in the research pertains to the sub-problem regarding the keywords of the studies. Figure 2 presents the findings derived from an analysis of these keywords. The figure was created using a 'Word Cloud' application that is available online.

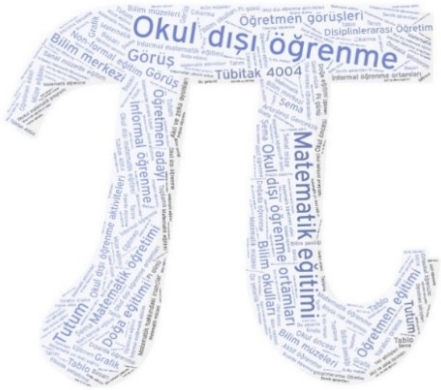


Figure 2. Word Cloud of keywords of the studies

When the keywords from studies on out-of-school learning environments in mathematics education included in the compilation were examined, 64 unique keywords were identified across 23 national studies. The most frequently used keywords were "Out-of-school learning" (n=16), followed by "Mathematics education" (n=13), "Out-of-school learning environments" (n=8), "Informal learning" (n=7), "Mathematics teaching" (n=5), "View" (n=3), and "Attitude" (n=3). The frequency of other keywords ranged between 1 and 2. The analysis revealed a scattered structure, with no specific keyword emerging as

the focal point of the studies published on mathematics education and out-of-school learning environments.

In international studies, the most commonly used keywords were "Out-of-school learning," "Mathematics education," and "STEM," each appearing four times. Other keywords included "Informal education" (n=2), "Funds of knowledge" (n=2), "Preservice teachers" (n=2), "Attitudes" (n=1), "Belief" (n=1), "Parental engagement" (n=1), "Parental involvement" (n=1), "Homework" (n=1), "Mathematical moments" (n=1), "Out-of-school environments" (n=1), "Caregiver-child" (n=1), "Symmetry" (n=1), "Constructionism" (n=1), "Multiple intelligence theory" (n=1), "Mobile technology" (n=1), "Seamless learning" (n=1), "Service learning" (n=1), "Creative problem solving" (n=1), and "Underrepresented students" (n=1).

3.2. Findings regarding the second sub-problem

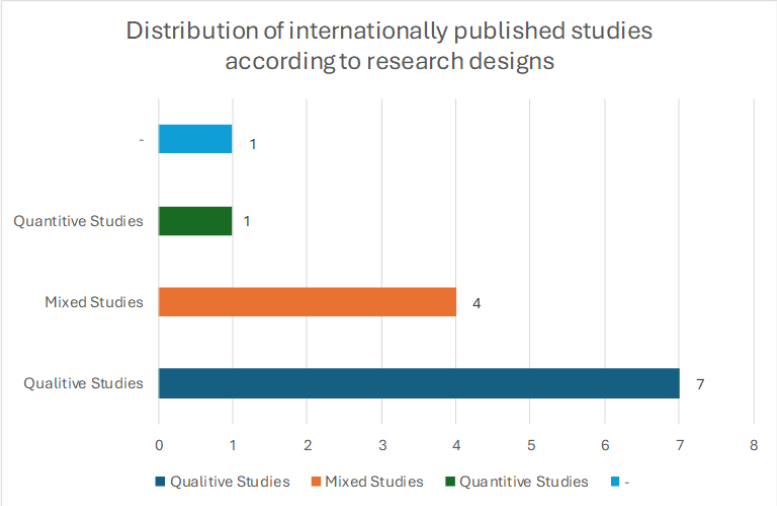
The second sub-problem of the research focuses on 'how studies conducted on out-of-school learning environments in mathematics education are distributed according to their methods (research design, sample, data collection tools, data analysis methods)'. In this context, national and international studies were examined based on their research designs, samples, data collection tools, and data analysis methods. The findings are presented below. Table 2 provides the distribution of studies on out-of-school learning environments in mathematics education at the national level, which is included in the scope of the research according to their research designs.

Table 2. Distribution of nationally published studies according to research designs

Type	Research Design	Frequency (*f*)	Percentage (%)
Qualitative Studies	Case study	6	26
	Phenomenology	2	9
	Phenomenography	1	5
	Phenomenological science	1	4
	Survey	1	4
	Unspecified	1	4
Total		12	52
Quantitative Studies	Quasi-experimental pre-post test	2	9
Total		2	9
Mixed Methodology	Purposive sequential design	1	4
	Unspecified	7	31
	Document analysis	1	4
Total		9	39
Overall total		23	100

Table 2 indicates that qualitative methods (f=12, 52%), quantitative methods (f=2, 9%), and mixed methods (f=9, 39%) were used as research designs in nationally published studies on out-of-school learning environments in mathematics education.

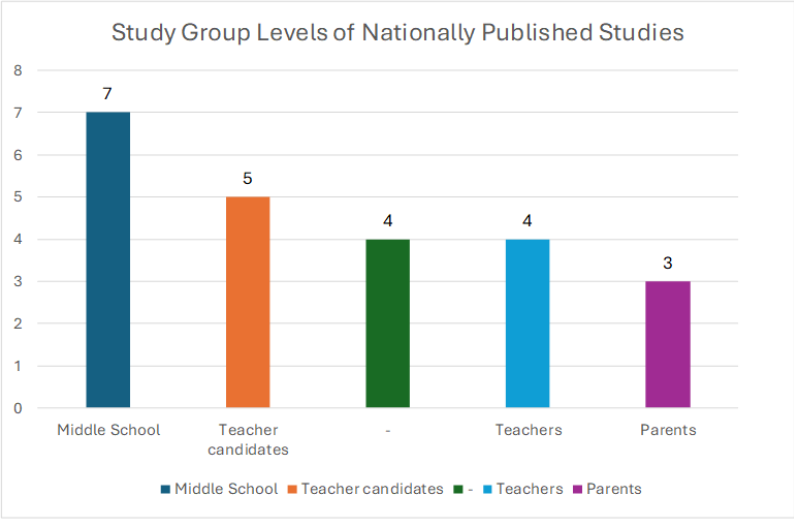
The distribution of international studies included in the research, based on their research designs, is presented in Graph 4:



Graph 4. Distribution of internationally published studies according to research designs

It was observed that the studies on out-of-school learning environments in mathematics education did not explicitly specify their research methods (qualitative, quantitative, or mixed). Upon examining Graph 4, it was found that approximately 70% of the studies (f=9) did not emphasize their research design. Additionally, two studies (15%) employed case studies, while another two studies (15%) utilized a mixed research method.

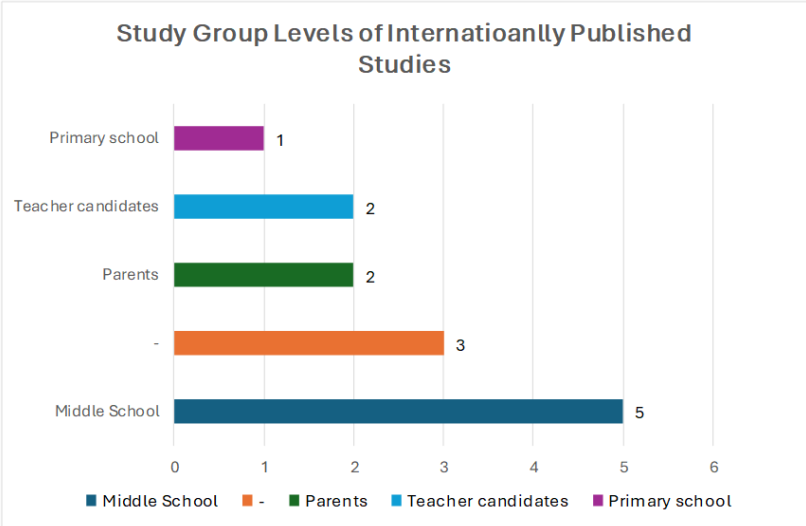
The study groups in the examined studies were analyzed to explore the distribution of research methods further. The distribution of the national studies based on study group levels is presented in the Graph 5:



Graph 5. Study group levels of nationally published studies

When Graph 5 is examined, it is observed that seven studies on out-of-school learning environments in mathematics education were conducted with middle school students additionally, five studies involved teacher candidates, four involved teachers, and three involved parents. The study group level was not specified in 4 of the studies.

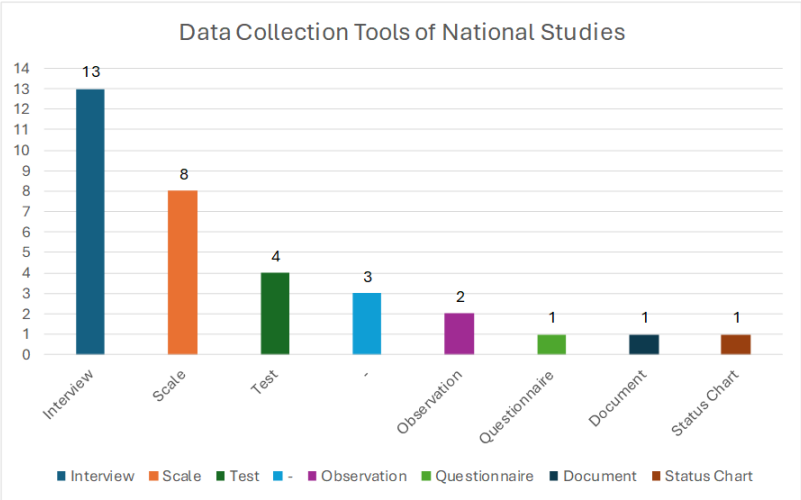
The distribution of international studies included in the research based on study groups is shown in Graph 6:



Graph 6. Study group levels of Internationally published studies

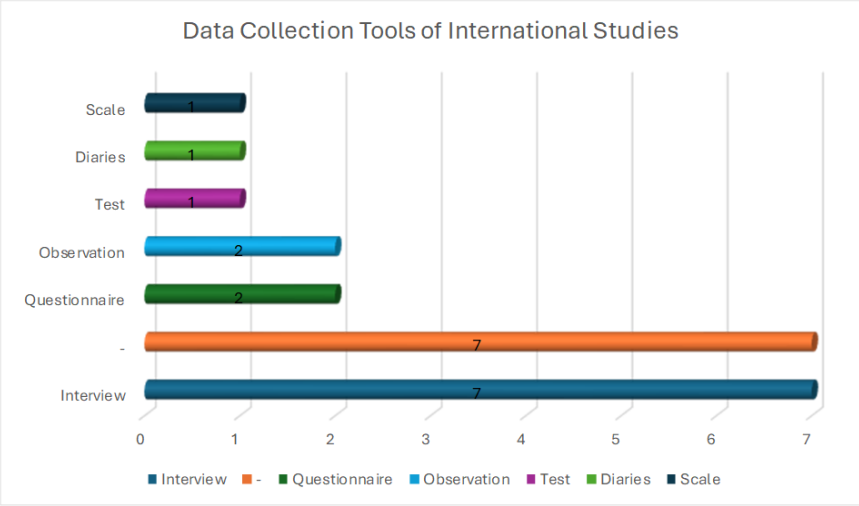
When examining the study group levels of international studies in Graph 6, it is observed that most studies focus on middle school students (f=5). Additionally, there are studies involving parents, teacher candidates, and primary school students. Notably, no studies on out-of-school learning environments in mathematics education were identified nationally or internationally for high school students, graduate students, or academicians.

Another criterion for analyzing the studies in terms of method is the data collection tools used. The distribution of national studies included in the research according to their data collection tools is as follows:



Graph 7. Data collection tools of national studies

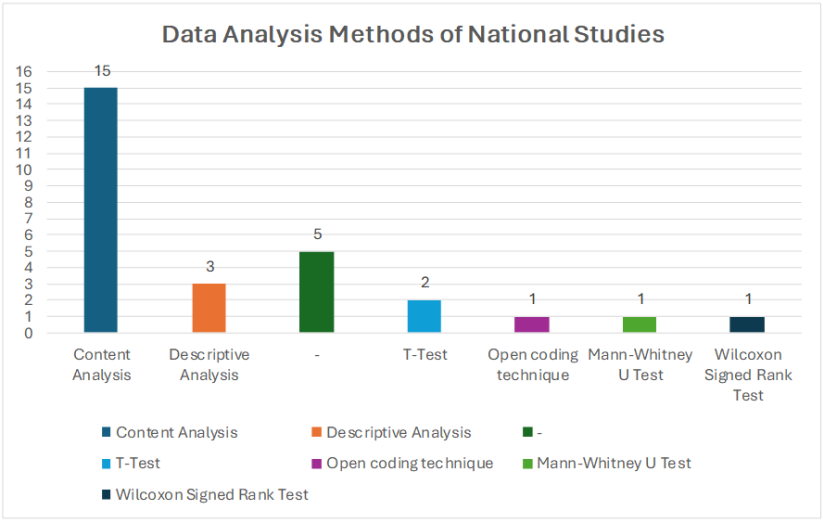
The distribution of the international studies examined according to data collection tools is given in graph 8:



Graph 8. Data collection tools of international studies

When examining the data collection tools used in international studies, interviews appear to be the most frequently preferred method (f=7). Tools such as surveys, observations, tests, diaries, and scales are also utilized. However, as shown in Graph 8, the data collection tools for seven studies are not specified.

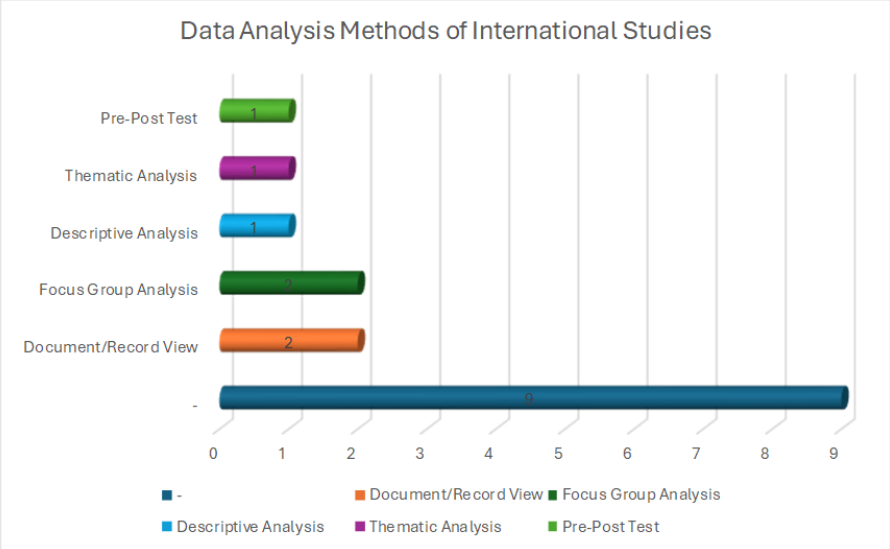
Another aspect examined to understand the methods used in studies on out-of-school learning environments in mathematics education is the data analysis methods employed. The distribution of national studies included in the research according to their data analysis methods is as follows:



Graph 9. Data analysis methods of national studies

When examining the data analysis methods used in studies on out-of-school learning environments in mathematics education, as shown in Graph 9, content analysis was found to be the most frequently preferred method (n=15). Other methods identified include descriptive analysis, t-test, open coding technique, Mann-Whitney U test, and Wilcoxon signed-rank test. However, it was determined that the data analysis method was not specified in four studies.

The distribution of international studies included in the research according to their data analysis methods is presented in Graph 10:



Graph 10 Data analysis methods of international studies

Among these studies, two utilized document review, and two employed focus group analysis. Additionally, one study used descriptive analysis, one employed thematic analysis, and another applied pre-test and post-test data analysis methods.

4. Discussion, conclusion and recommendations

This research aimed to systematically compile studies on out-of-school learning environments in mathematics education, analyze them holistically, and identify their trends. The study is significant for generating ideas and guiding future research on out-of-school learning environments within mathematics education. In this context, 36 studies published in national and international databases were included in the research.

Saraç [57], who conducted a content analysis of studies on out-of-school learning environments in Türkiye, highlighted the lack of research in this area within the field of mathematics education up to 2017. The findings of this study align with Saraç's observations, as national studies on out-of-school learning environments in mathematics education were primarily conducted after 2018. This increase is believed to be influenced by the 2023 Vision Document published by the MoNE in 2018 and the subsequent guides on out-of-school learning environments issued by provincial National Education Directorates.

The 2023 Vision Document [78] emphasizes that course activities aimed at fostering students' creative thinking, research, inquiry, and discovery skills can be conducted outside school boundaries [8, 39, 46]. An examination of international research reveals that studies on mathematics education and out-of-school learning environments date back to 1985 [73]. Although no significant increase occurred in subsequent years, such studies have continued sporadically. Overall, both national and international research on out-of-school learning environments in mathematics education suggests that this field remains underexplored.

An analysis of the keywords used in national studies on out-of-school learning environments in mathematics education, as included in this research, identified a total of 71 different keywords across 23 studies. The terms “out-of-school learning” and “mathematics education” were the most prevalent. However, other keywords appeared fragmented, indicating that the studies lacked a unified focus. Another notable observation is the frequency of the terms “view” (used 4 times) and “attitude” (used 3 times), suggesting that many studies in this area concentrated on exploring attitudes [9, 10, 22, 38, 39, 61, 67, 72].

When the study group levels of research on out-of-school learning environments in mathematics education are examined, it is observed that middle school levels are the most commonly studied. However, studies at the primary and preschool levels appear to be insufficient. This suggests that out-of-school learning activities are underutilized at the preschool and primary school levels. Considering that children's interactions with concrete objects support their understanding of abstract concepts [59], this is particularly significant in mathematics education, where abstract concepts are prevalent. Activities conducted in out-of-school learning environments that allow students to engage with concrete objects can enhance their abstraction skills. Therefore, there is a pressing need for more applications of out-of-school learning environments in mathematics education at the preschool and primary school levels.

Another aspect examined in this research is the design of studies on out-of-school learning environments. It is observed that the majority of these studies adopt qualitative research methods. Within this context, case studies are predominantly used, data is often collected through interviews, and content analysis is the most commonly employed data analysis method in qualitative research. The scarcity of quantitative and mixed-method studies highlights a significant gap in the field. There is a clear need for more quantitative and mixed-method research on out-of-school learning environments in mathematics education. Quantitative studies are almost non-existent at national and international levels, and experimental studies are similarly rare. The prevalence of case studies reflects the overall trend in the field but also underscores the lack of application-oriented research. This suggests a need for more process-oriented, exploratory, and planning-focused studies on out-of-school learning activities designed for these environments. Expanding the range of research methods to include quantitative, mixed-method, and phenomenological approaches, particularly those that offer models for out-of-school learning environments, would significantly contribute to the diversity and development of the field.

When the mathematics curriculum is examined, it is noted that students transition from concrete thinking to abstract thinking during the middle school years [48]. According to the findings, while studies on out-of-school learning environments and mathematics education predominantly focus on the middle school level, these studies often remain superficial due to their qualitative nature. During this critical period, where students transform concrete information into abstract concepts, utilizing out-of-school learning environments through various activities can facilitate a positive transition by enabling students to meaningfully connect the knowledge acquired in school with their surroundings [45].

The emphasis on out-of-school learning environments in the new Turkish Century Education Model mathematics curriculum published by the MoNE in 2024 is evident in

the statement: “The time allocated for lesson hours is the time allocated for out-of-school learning activities, research, and observation, social activities, project work, local studies, reading studies, etc.” [49, 50]. This highlights the importance of activity-based studies in mathematics education within out-of-school learning environments. However, while current research evaluates activity-based studies at a sufficient level, there remains a need for further investigation into how these activities impact students' academic success and attitudes. Additionally, the lack of adequate quantitative research in this area underscores the necessity for further studies exploring these effects.

Experimental and activity-based studies play a crucial role in supporting teachers with activities conducted outside the school environment. The study titled Mathematics Teachers’ Views on Out-of-School Learning Environments by Aydoğdu et al. [8] concluded that mathematics teachers lack sufficient knowledge about out-of-school learning environments. Experimental and activity-based research in this area can help mathematics teachers utilize these environments more effectively in line with the new curriculum. In this context, alongside studies that explore the current situation—such as those focusing on attitudes and opinions— it is equally essential to prioritize research that includes experimental, activity-based approaches, achievement-environment matching, and effective out-of-school teaching designs. Such studies can provide valuable insights into students’ attitudes, motivation, academic success, and perceptions of out-of-school learning environments in mathematics education.

Moreover, a notable gap is a lack of scale development studies in mathematics education for out-of-school learning environments. Addressing this deficiency through the development of scales and tools to assess variables such as attitudes, motivation, and academic achievements of teachers, prospective teachers, and students is essential. These efforts will help to establish a more comprehensive understanding of out-of-school learning environments and their impact on mathematics education.

References

[1] Alisinanoğlu, F., Kesicioğlu, O. S., & Mart, M., Evaluation of pre-school children’s development of geometric thought in the UK and Turkey according to van Hiele model, **International Journal of Education and Research**, 1(10), 1-10, (2013).

[2] Andersson, C., & Johansson, P., Social stratification and out-of-school learning, **Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society**, 176(3), 679-701, (2013).

[3] (*) Andreev, C., Of the nature of math and math in nature – A sequel about symmetry for children and adults, **Mathematics and Informatics,** 64(4), 425-437, (2021).

[4] (*) Andrews, J., & Yee, W. C., Children’s ‘funds of knowledge’ and their real life activities: two minority ethnic children learning in out-of-school contexts in the UK, **Educational Review**, 58(4), 435–449, (2006).

[5] (*) Ata Doğan, S., & Akman, B., Pre-school teachers’ views and practices on the use of indoor and outdoor in math activities, **Journal of National Education**, 52(238), 621-654, (2023).

[6] (*) Aydoğdu, M. Z., & Aydoğdu, A. S., Okul dışı öğrenme ortamlarında geometri öğretimi [Teaching geometry in out-of-school learning environments], (2023).

https://www.researchgate.net/profile/Mustafa-Aydogdu-5/publication/377117460_OKUL_DISI_OGRENME_ORTAMLARINDA_GEOMETRI_OGRETIMI_GEOMETRY_TEACHING_IN_OUT_OF_SCHOOL_LEARNING_ENVIRONMENTS/links/65968a370bb2c7472b320eee/OKUL-DISI-OeGRENME-ORTAMLARINDA-GEOMETRI-OeGRETIMI-GEOMETRY-TEACHING-IN-OUT-OF-SCHOOL-LEARNING-ENVIRONMENTS.pdf

[7] (*) Aydoğdu, A. S. E., Aydoğdu, M., & Aktaş, V., Virtual museum use as an educational tool in math class, **International Journal of Social Science Research**, 11(1), 51-70, (2022).

[8] (*) Aydoğdu, A. S. E., Aydoğdu, M. Z., & Aktaş, V., The opinions of mathematics teachers about out-of-school learning environments, **The Journal of Buca Faculty of Education**, (55), 60-78, (2023).

[9] (*) Aydoğdu, M. Z., & Aydoğdu, A. S., Preservice mathematics teachers' opinions on the out of school learning environments, **Cumhuriyet International Journal of Education**, 13(1), 1-15, (2024).

[10] (*) Bahadır, E., & Hırdıç, K., Students' opinions about the learning activities in mathematics museum and their contributions to the mathematical process, **Electronic Turkish Studies**, 13(26), 151-172, (2018).

[11] Bozdoğan, A. E., & Yalçın, N., The effects of science centers on the change of "science interest" levels of primary education students and on their academic success: Energy park, **Ege Journal of Education**, 7(2), 95-114, (2006).

[12] Bozdoğan, A. E., Planning and evaluation of field trips to informal learning environments: Case of the' energy park,. **Journal of Theory & Practice in Education (JTPE)**, 4(2), 282-290, (2008).

[13] Braund, M., & Reiss, M., The nature of learning science outside the classroom. In M. Braund & M. Reiss (Eds.), **Learning science outside the classroom**, 1-12, (2004).

[14] (*) Celedón-Pattichis, S., LópezLeiva, C. A., Pattichis, M. S., & Llamocca, D., An interdisciplinary collaboration between computer engineering and mathematics / bilingual education to develop a curriculum for under represented middle school students, **Cultural Studies of Science Education**, 8, 873-887, (2013).

[15] Christensen, L. B., Johnson, R. B., & Turner, L. A. Research methods design and analysis, **Pearson**, (2015).

[16] (*) Civil, M., STEM learning research through a funds of knowledge lens, **Cultural Studies of Science Education**, 11, 41-59, (2016).

[17] (*) Çakmak Gürel, Z., Developing activity skills of preservice mathematics teachers for out-of-school learning environments, **Journal of Research in Informal Environments**, 8(2), 192-210, (2023).

[18] Çalık, M., & Sözbilir, M., Parameters of content analysis, **Education and Science**, 39(174), 33-38, (2014).

[19] Çepni, S., Araştırma ve proje çalışmalarına giriş [Introduction to research and project work] (8th ed), Celepler Matbaacılık, (2018).

[20] Çığrık, E., & Özkan, M., The effect of science center learning activities on students' science achievement and relationship with motivation level, **Journal of Uludag University Faculty of Education**, 29(2), 279-301, (2016).

[21] (*) Diaz, M. E., & Bussert-Webb, K., Latino youth "out-of-school math and science experiences: Impact on teacher candidates, **International Journal of Research in Education and Science (IJRES)**, 3(2), 624-635, (2017).

[22] Ata Doğan, S., & Akman, B., Pre-School Teachers Views and Practices on the Use of Indoor and Outdoor in Math Activities, **Milli Eğitim**, 52(238), 621-654, (2023).

[23] (*) Duatepe-Paksu, A., Kazak, S., & Çontay, E. G., Evaluation of mathematics activities performed in out-of-school environments: "Mathematics everywhere" project, **MSKU Journal of Education**, 9(2), 541-558, (2022).

[24] Eshach, H., Bridging in-school and out-of-school learning: Formal, non-formal, and informal education, **Journal of science education and technology**, 16(2), 171-190, (2007).

[25] (*) Evcan, S. S., Adilov, G., Eken, Z., Barut, S., Kemali, S., & Tınaztepe, G., The evaluation of the project entitled "Mathematics in our life: Agriculture" conducted for 7th grade students within the scope of TUBITAK 4004-nature education and science schools, **International Journal of Scholars in Education**, 3(1), 28-41, (2020).

[26] Farrow, R., Iniesto, F., Weller, M., & Pitt, R., GO-GN research methods handbook, **Global OER Gradate Network**, (2020).

[27] Genç, M., Albayrak, S., & Söğüt, S., Fen bilimleri öğretmen adaylarının okul dışı öğrenme ortamlarına ilişkin görüşleri [Opinions of science teacher candidates on out-of-school learning environments], In **International Congresses on Education 2010 Book of Proceedings** (pp. 233-239), Edugarden, (2019).

[28] Gökdemir, F., & Dolgun, G., Writing material & method section in qualitative, quantitative, systematic review, meta-analysis, and meta-synthesis studies, **Archives of health science and research (Online)**, 7(2), 189-195, (2020).

[29] Jarvis, T., & Pell, A., Factors influencing elementary school children's attitudes toward science before, during, and after a visit to the UK National Space Centre, **Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching**, 42(1), 53-83, (2005).

[30] (*) Jay, T., Rose, J., & Simmons, B., Why is parental involvement in children's mathematics learning hard? Parental perspectives on their role supporting children's learning, **Sage Open**, 8(2), 1-13, (2018).

[31] Kabapınar, Y., Sosyal bilgiler öğretim programlarında "okul dışı öğrenme "ye bakmak: "Bize her yer sınıf bize her yer öğrenme ortamı" [Looking at learning outside the school in social studies curriculum: hey place classroom for us, everywhere learning environment for us], In A. Şimsek and S. Kaymakcı (Eds.), **Okul dışı sosyal bilgiler öğretimi** [Teaching in Out-of-School Social Studies] (pp. 43-73), Pegem Academy, (2015).

[32] Karaçam, Z., Systematic review methodology: A guide for preparation of systematic review, **Dokuz Eylül University Faculty of Nursing Electronic Journal.** 6(1), 26-33, (2013).

[33] (*) Karataş, F. Ö., Cengiz, C., & Arslan, Z., Fun way of learning: effectiveness of science and technology festival, **Journal of Research in Informal Environments**, 5(1), 95-119, (2020).

[34] (*) Karamık, G. A., & Gümüş, F. Ö., A different application for teaching mathematics in the virtual museum and creative drama, **Gazi University Faculty of Education Journal,** 42(3), 1915-1957, (2022).

[35] (*) Karamustafaoğlu, O., & Pektaş, H. M., Developing students' creative problem solving skills with inquiry-based STEM activity in an out-of-school learning environment, **Education and Information Technologies**, 28(6), 7651-7669, (2023).

[36] Kassas, M., Environmental education: biodiversity, **The Environmentlist**, 22, 345-351, (2002).

[37] (*) Kayhan Altay, M., & Yetkin Özdemir, E., The use of museum resources in mathematics education: a study with preservice middle-school mathematics teachers, **Journal of Education for Teaching**, 49(4), 616-629, (2023).

[38] (*) Kesicioğlu, O. S., & Alisinanoğlu, F., The process of pre-school term children's out of school (informal) mathematics learning, **The Journal of Academic Social Science Studies**, 6(7), 671-685, (2013).

[39] (*) Kır, H., Kalfaoğlu, M., & Aksu, H., Mathematics teachers' opinions on the use of out-of-school learning environments, **InternationalJournal of Educational Studies in Mathematics**, 8(1), 59-76, (2021).

[40] Koçdemir, M., School participatory budgeting practice as a learning by doing activity, **Social Sciences Research Journal**, 10(4), 990-1007, (2021).

[41] (*) Kurtuluş, A., Informal (out-of-class) learning environment pi day: Example of jeopardy, **Journal of Research in Education and Teaching**, 4(1), 107-116, (2015).

[42] (*) Kuş, M., Pre-service mathematics teachers' perspectives on teaching mathematics in out-of-school learning environments, **Nevşehir Hacı Bektaş Veli University Journal of ISS**, 13(4), 2174-2195, (2023).

[43] (*) Kuş, M., Conceptualization of out-of-school mathematics education, **Journal of Education for Life**, 38(1), 245–257, (2024).

[44] (*) Masingila, J. O., & King, K. J., Middle school students' use of function ideas in everyday mathematics, (1996).

[45] Masingila, J. O., Muthwii, S. M., & Kimani, P. M., Understanding student's out-of school mathematics and science practice, **International Journal of Science and Mathematics Education**, 9, 89-108, (2011).

[46] Metin Göksu, M., & Sömen, T., Okul dışı öğrenme ortamlarının geliştirilmesi [Developing out-of-school learning environments], In A. Küçükoğlu, & H. İ. Kaya (Ed.), **Kuramdan uygulamaya okul dışı öğrenme ortamları** [From theory to practice in out-of-school learning environments], (pp. 88-137), Pegem Akademi, (2020).

[47] Morag, O., & Tal, T., Assessing learning in the outdoors with the field trip in natural environments (FiNE) framework, **International Journal of Science Education**, 34(5), 745-777, (2012).

[48] Ministry of National Education (MoNE), Matematik dersi öğretim programı (ilkokul ve ortaokul 1,2,3, 4, 5, 6, 7 ve 8. sınıflar) [Mathematics course curriculum (primary and secondary school 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8th grades)], MEB Yayınları, (2018).

[49] Ministry of National Education (MoNE), İlkokul matematik dersi öğretim programı (1,2,3, ve 4. sınıflar) [Primary school mathematics course curriculum (1st, 2nd, 3rd and 4th grades)], MEB Yayınları, (2024a).

[50] Ministry of National Education (MoNE), Ortaokul matematik dersi öğretim programı (5, 6, 7, ve 8. sınıflar) [Elementary school mathematics course curriculum (5th, 6th, 7th and 8th grades)], MEB Yayınları, (2024b).

[51] Oktay, Ö., Ekinci, S., & Şen, A. İ., Investigation of middle school students' thoughts about a mobile planetarium activity, **Elementary Education Online**, 19(2), 695–717, (2020).

[52] Okul Dışı Öğrenme Ortamları Kılavuzları. (https://okuldisiogrenme.com/okulum-turkiye/).

[53] Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D., The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews, **British Medical Journal**, 372, n71, (2021).

[54] (*) Poçan, S., Altay, B., & Yaşaroğlu, C., Parents' opinions on the use of mobile technology in teaching mathematics, **Inonu University Journal of the Faculty of Education**, 22(1), 500-532, (2021).

[55] (*) Poçan, S., Altay, B., & Yaşaroğlu, C., The effects of mobile technology on learning performance and motivation in mathematics education, **Education and Information Technologies**, 28(1), 683-712, (2023).

[56] Salmi H., Science Centre Education. Motivation and Learning in Informal Education Research Report 119 [Unpublished dissertation], University of Helsinki, (1993).

[57] Saraç, H., Researches related to outdoor learning environments in Turkey: Content analysis study, **Journal of Education, Theory and Practical Research**, 3(2), 60-81, (2017).

[58] Senemoğlu, N., Gelişim, öğrenme ve öğretim kuramdan uygulamaya [Development, learning and teaching from theory to practice.], (21st ed). Pegem Akademi Yayıncılık, (2012).

[59] Skemp, R. R., The psychology of learning mathematics, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, (1987).

[60] (*) Simpson, A., Zhong, Q., & Maltese, A., Spontaneous mathematical moments between caregiver and child during an engineering design project, **Early Childhood Education Journal**, 51(2), 211-222, (2023).

[61] (*) Sözer, Y., Investigation of the effects of an outdoor summer math. camp on high school students through the students' views, **Adnan Menderes Üniversitesi Eğitim Fakültesi Eğitim Bilimleri Dergisi**, 4(2), 1-18, (2013).

[62] Sturm, H., & Bogner, F., Learning in workstations in two different environments: A museum and a classroom, **Studies in Educational Evaluation**, 36(1-2). 14-19, (2010).

[63] (*) Temel, H., The Effect of the out-of-school learning environments course in teaching mathematics on the opinions of teacher candidates, **Necatibey Faculty of Education Electronic Journal of Science and Mathematics Education**, 17(Special Issue), 553-592, (2023).

[64] Tösten, R., Okul dışı eğitim ve öğrenme [Out-of-school education and learning], In A. Küçükoğlu and H. İ. Kaya (Ed.), **Kuramdan uygulamaya okul dışı öğrenme ortamları** [From theory to practice in out-of-school learning environments], Pegem Akademi. (2020).

[65] (*) Tutak, T., Nayıroğlu, B., & Özer, T., Evaluation of the "My mind cuts mathematics" project for secondary school students within the scope of TUBITAK 4004, **Journal of Anatolian Education Research**, 7, 12-17, (2023).

[66] Türkmen, H., İnformal (sınıf-dışı) fen bilgisi eğitimine tarihsel bakış ve eğitimimize entegrasyonu [Historical perspective on informal (outside-class) science education and its integration into our education], **Çukurova Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, 3(39), 46-59, (2010).

[67] (*) Usta, N., Gürçay, S., Sakioğlu, Ş. N., & Demir, F., The effect of out-of-school-learning environment applications on students' mathematics achievement and

their opinions on the application, **Journal of Education for Life**, 37(3), 711-733, (2023).

[68] Wach, E; Ward, R.; & Jacimovic, R., Learning about qualitative document analysis**, IDS Practice Paper In Brief,** 13, (2013).

[69] Worth K., Science in early childhood classrooms: Content and process, Early Childhood Research and Practice, **SEED Conference**, (2010).

[70] Yaşar, M., Qualitative problem in qualitative research, **MSKU Journal of Education**, 5(2), 55-73, (2018).

[71] Yılmaz, K., Systematic review, meta evaluation, and bibliometric analysis in social sciences and educational sciences, **MANAS Journal of Social Studies**, 10(2), 1457-1490, (2021).

[72] (*) Yıldırım, Y., & Güler, B., Parents' and students' views on mind and intelligence games in out of-school environments, **Journal of Interdisciplinary Education: Theory and Practice**, 6(1), 15-33, (2024).

[73] (*) Weidman, J. C., & LeMahieu, P., Parent involvement in children's out-of-school learning: The MAP-AT-HOME program, (1985).

[74] (*) Zhou, L., Suazo-Flores, E., Sapkota, B., Mbewe, R., & Newton, J., Image of mathematics in- and out-of-school: A case study of two original participants in an afterschool STEM club–Girls Excelling in Math and Science (GEMS), (2021).

[75] (*) Ürey, M., Çepni, S., Köğce, D., & Yıldız, C., An investigation on the effects of the interdisciplinary school garden program developed within the scope of free activities course on mathematics objectives, **Journal of Turkish Science Education**, 10(3), 37-58, (2013).

[76] Şentürk, E., & Özdemir, Ö. F., The effect of science centres on students' attitudes towards science. **International Journal of Science Education**, Part B, 4(1), 1–24, (2012).

[77] Şimşek, A., & Kaymakçı, S., Okul dışı sosyal bilgiler öğretiminin amacı ve kapsamı [The purpose and scope of out-of-school social studies teaching], In A. Şimsek and S. Kaymakcı (Eds.), Okul dışı sosyal bilgiler öğretimi [Teaching in Out-of-School Social Studies] (pp. 1-10), Pegem Academy, (2015).

[78] MEB Vizyon Belgesi. https://baklan.meb.gov.tr/www/meb-2023-vizyon-belgesi/icerik/330

*The studies that are part of the systematic review are marked with an asterisk (*).

Appendices

Appendix 1 : Article Classification Form (TR)

<table>
<tr><td colspan="5">MAKALE SINIFLAMA FORMU</td></tr>
<tr><td>MAKALENİN ADI</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>YAZARI</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>YAYIN YILI</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>DERGİSİ</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">ARAŞTIRMA YÖNTEMİ</td><td>NİTEL</td><td colspan="2">NİCEL</td><td>KARMA</td></tr>
<tr><td>☐ Durum çalışması
☐ Olgubilim
☐ Örnek olay
☐ Teori oluşturma
☐ Fenomenoloji
☐ Tarama
☐ Diğer …….</td><td colspan="2">☐ Deneysel
☐ Yarı Deneysel
☐ Zayıf Deneysel
☐ Tek Denekli
☐ Karşılaştırmalı
☐ Korelasyonel
☐ Diğer ……..</td><td>☐ Açıklayıcı
☐ Keşfedici
☐ Çeşitleme
☐ Gömülü</td></tr>
<tr><td>ÖRNEKLEM</td><td colspan="2">☐ Okul öncesi
☐ İlköğretim
☐ Ortaöğretim
☐ Lisans
☐ Lisansüstü</td><td colspan="2">☐ Öğretmen
☐ Yönetici
☐ Veliler
☐ Diğer …….</td></tr>
<tr><td rowspan="2">VERİ TOPLAMA ARAÇLARI</td><td rowspan="2">☐ Anket
☐ Başarı testi
☐ Algı/Tutum/Yetenek/Kişilik Testi
☐ Görüşme
☐ Gözlem
☐ Günlük
☐ Diğer ……</td><td colspan="2">VERİ ANALİZ YÖNTEMLERİ</td></tr>
<tr><td colspan="2">☐ İçerik Analizi
☐ Betimsel Analiz
☐ T- testi
☐ Korelasyon
☐ ANOVA/ANCOVA
☐ MANOVA/MANCOVA
☐ Faktör Analizi
☐ Regresyon
☐ Non Parametrik Testler
☐ Diğer ……</td></tr>
</table>

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 27 SAYI: 2 **Temmuz 2025** **ISSN 1301-7985**
eISSN 2536-5142

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ MAKALE YAZIM KURALLARI

- Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology) bütün Fen, Mühendislik ve Mimarlık Anabilim Dallarını ilgilendiren konulardaki önemli, özgün, kaliteli araştırma ve çalışma makalelerini yayınlayan ***hakemli ve bilimsel*** bir dergidir. Ocak ve Temmuz aylarında olmak üzere yılda iki kez yayınlanır.
- Dergide yayımlanan makaleler başka hiçbir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Kısmen veya tamamen yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden hiçbir yerde kullanılamaz. Dergiye gönderilen makalelerin içerikleri özgün, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Değerlendirmeye sunulacak çalışmaların bir başka dergiye gönderilmediği veya basılmadığı ön yazı ile ***mutlaka belirtilmelidir.***
- ***Dergi yazım kuralları aynı zamanda baskı formatıdır***. Bu nedenle yazım kurallarının yazar veya yazarlarca dikkatle uygulanması gerekmektedir. Yazım kurallarına uygun olmayan yazılar, yazarlara geri gönderilecektir.
  Göstereceğiniz ilgi için teşekkür ederiz.

Sayfa boyutu, sayısı ve kenar boşlukları	A4 formatında, en fazla (eğer mümkünse) 12 sayfa olmalıdır. Sol ve Sağ : 3 cm, Üst ve Alt: 2,5 cm.
Sayfa numaraları	Sayfa numaraları sayfa altında ve ortada verilmelidir.
Satır boşlukları	Bütün satır boşlukları Times New Roman karakterinde ve 12 punto olmalıdır.
Metin	Times New Roman karakterinde 12 punto ile, sağa ve sola dayalı olarak tek aralıklı yazılmalıdır. Noktadan sonra 2 boşluk, virgülden sonra 1 boşluk bırakılmalıdır.

Paragraf	Her paragraf arasında bir satır boşluk bırakılmalı, paragraf başlarında içerden başlanmamalıdır (Tab tuşu kullanılmamalıdır).
Makale başlığı	Sayfa başından 5 satır boşluk bırakıldıktan sonra, Times New Roman, 20 punto (koyu olmayacak) ile başlığın sadece ilk harfi büyük olacak şekilde sayfa ortalanarak yazılmalıdır.
Yazar adı veya adları	Başlıktan sonra 2 satır boşluk bırakılarak, ünvan belirtilmeden, Adın ilk harfi ve SOYAD'ın tamamı büyük harf ile, birden fazla yazarlarda aralarına virgül konularak, Times New Roman, 12 punto, **koyu** ve sayfa ortalanarak yazılmalıdır.
Yazarın/ların adresi/leri	Yazar adının hemen altına boşluk bırakılmadan, Times New Roman, 10 punto ve *italik* olarak yazılmalıdır. Adresleri aynı olan yazarlar için tek adres, farklı yazar adresleri alt alta boşluk bırakılmadan yazılmalıdır.
İletişim yazarının bilgileri	Bütün yazarlar için Sorumlu yazar ilk sırada olacak şekilde; Ünvansız Ad SOYAD, e-mail adresi, ORCID ID numarası (http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx.) aralarına virgül konularak 1. sayfanın altına dipnot olarak, Times New Roman, 10 punto ile yazılmalıdır.
Türkçe özet	Adres/ler den 3 satır boşluk bırakıldıktan sonra, **Özet** kelimesi Times New Roman yazı karakterinde, 12 punto, **koyu** ve sola dayalı olarak yazılmalıdır. *Özet metni* Times New Roman yazı karakterinde, 12 punto ve *italik* olarak yazılmalıdır. Özet metninin 200 kelimeyi geçmemesine özen gösterilmelidir. Özet kelimesi ile özet metni arasında bir satır boşluk bırakılmalıdır.
Anahtar kelimeler Keywords	***Anahtar kelimeler:*** ve ***Keywords***: kelimeleri Türkçe özetin ve İngilizce özetin altına bir satır boşluk bırakılarak, Times New Roman, 12 punto, ***koyu*** ve ***italik*** olarak yazılmalıdır. En az 3 en fazla 6 adet anahtar kelime verilmeli, anahtar kelimelerin birincisinin ilk harfi büyük diğerleri küçük harfle ve aralarına virgül konularak verilmelidir.

İngilizce başlık ve Abstract	Türkçe anahtar kelimelerin altına 2 satır boşluk bırakılarak, Times New Roman, 16 punto (koyu olmayacak) ile başlığın sadece ilk harfi büyük olacak şekilde sayfa ortalanarak yazılmalıdır. Abstract, Türkçe özet formatında yazılmalıdır.
Ana başlıklar	Ana Başlıklar sırasıyla numaralandırılmalıdır (**1. Giriş 2. Deneysel çalışmalar** gibi). **Tüm başlıklar** sola dayalı Times New Roman, 12 punto, **koyu** ve sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olacak şekilde yazılmalıdır. Ana başlıklardan önce 2 satır, sonra 1 satır boşluk bırakılmalıdır.
Alt başlıklar	Alt başlıklar ana başlık numarasına uygun olarak numaralandırılmalıdır. ***Tüm alt başlıklar*** sola dayalı Times New Roman, 12 punto, ***koyu*** ve ***italik*** olarak sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olacak şekilde yazılmalıdır (***2.1. Malzeme 2.2. Isıl işlemler*** gibi). Alt başlıklardan önce tek satır boşluk bırakılmalı, sonra ise boşluk bırakılmadan metine geçilmelidir.
Şekiller Resimler Fotoğraflar	Sayfa sınırlarını aşmayacak şekilde ortalanarak, net ve okunaklı olmalıdır. Sıra ile numaralandırılmalıdır. Şekil no ve adları şeklin altında ortalanarak ve sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olarak verilmelidir. Şekiller ya bir çizim programı ile çizilmiş olmalı ya da en az 300 dpi çözünürlükte taranmış olmalıdır. Şekil olarak gösterilen grafik, resim ve metin kutularında yer alan yazı ve sayıların büyüklüğü makale içinde Times New Roman karakteri ile yazılmış 9 punto boyutundaki bir yazının büyüklüğünden az olmamalıdır. Şekilden önce, şekil adından önce ve sonra birer satır boşluk bırakılmalıdır. Şekiller metin içine yerleştirilirken mutlaka şekilden önce atıfta bulunulmalıdır.

Tablolar	Sayfa sınırlarını aşmayacak şekilde ortalanarak konulmalıdır. Sıra ile numaralandırılmalıdır. Tablo no ve adları, tablonun üstünde tek satır boşluk ile sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olacak şekilde ortalanarak yazılmalıdır. Tablo adı yazılırken üstte ve altta birer satır, tablodan sonra yine bir satır boşluk bırakılmalıdır. Tablolara tablodan önce mutlaka metin içerisinde atıfta bulunulmalıdır. Tablo satır ve sütunlarındaki rakam ve yazılar Times New Roman 12 punto ile yazılmalıdır. Ancak zorunlu kalınan durumlarda yazı boyutu yazı sınırlarını geçmeyecek şekilde en az 9 puntoya kadar düşürülebilir.
Denklemler	Metin içerisine yazılacak denklemler, word yazım programındaki denklem editörü ile sola dayalı olarak yazılmalı ve eşitliklere sağa dayalı olarak parantez içerisinde sıra ile numara verilmelidir.
Semboller	Makale çok sayıda sembol içeriyor ya da makaledeki sembollerin açıklanması gerekiyorsa uluslararası standarda uygun olarak, semboller, kaynaklardan önce, Times New Roman 12 punto ile italik yazılmalıdır. Makalede ondalık gösterimde nokta kullanılmalı, binlikleri ayırırken virgül veya nokta kullanılmamalı gerekiyorsa tek boşluk kullanılmalıdır.
Kaynaklar	Kaynaklar metin içerisinde sıra ile numaralandırılmalıdır. Makalenin sonunda bulunan kaynaklar bölümündeki sıralama, metinde verilen sıraya uygun olarak yapılmalıdır. Atıfta bulunulan kaynaklar; ya ….. [1]. şeklinde cümlenin sonunda yada ….. [1], ….. şeklinde cümle içinde verilmelidir. İki veya daha fazla kaynak yazarken verilecek kaynaklar sıralı ise [1,2,3,4] şeklinde değil, [1-4] şeklinde verilmelidir. Sıralı değil ise [8,11,15] şeklinde verilmelidir. Kaynaklar, Times New Roman 12 punto ile yazılmalı, sadece dergi, kitap ya da sempozyum adı kalın yazılmalıdır. Kaynaklar kısmında yer alan ulusal-uluslararası makalelerin yer aldığı dergi adları kısaltılmış halleriyle değil, açık olarak yazılmalıdır (örnek: dergi adı Wat. Res. şeklinde değil Water Resources şeklinde yazılmalı).

Ulusal - Uluslararası Makaleler

[1] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flocculation and sedimentation of high turbidity water, **Water Resources**, 25, 9, 1137-1143, (1998).

Ulusal - Uluslararası Bildiriler

[2] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flocculation and sedimentation of high turbidity waters, **Proceedings, 9th Biennial Conference**, International Association on Water Quality, 1137–1143, Vancouver, (1998).

Ulusal - Uluslararası Kitap

[3] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., **Flocculation and sedimentation**, 295, Technomics Press, Lancaster PA, (1998).

Kitap İçinde Bölüm

[4] Blackburn, T., **Flocculation and sedimentation** in Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Physical Processes, Technomics Press, 29-45, Lancaster PA, (1998).

Editörlük

[5] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., **Flocculation and sedimentation**, 295, Technomics Press, Lancaster PA, (1998).

Makaleler

[6] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, **Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi**, 7, 4, 26–32, (1998).

[7] Snell, F. D. ve Ettre, L. S., **Encyclopedia of Industrial Chemical Analysis**, 14, Interscience, New York, (1971).

Basılmış Bilimsel Rapor

[8] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., The effect of velocity gradient in flocculation, Technical Report, NATO Science for Stability Programme, 150, Brussels, (1998).

Mesleki Teknik Rapor

[9] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, Teknik Rapor 45, İTÜ Geliştirme Vakfı, İstanbul, (1998).

Doktora, Y.Lisans Tezi

[10] Türker, K., Yapıların deprem davranışının belirlenmesi için çok modlu uyarlamalı yük artımı yöntemi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2005).

Standartlar

[11] TS825, Binalarda ısı yalıtım kuralları, **Türk Standartları**, Ankara, (1998).

Güncel Yazı

[12] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, **Bilim ve Teknik**, 363, 8, 23–45, (1998).

[13] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, **Milliyet Gazetesi**, sf.2, 3, 24, (1998).

Web adresleri

[14] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, (1998). http://www.server.com/projects/paper2.html, (20.05.2004).